

**Evaluación de la resistencia a la compresión de un concreto con la sustitución de residuos
de construcción y demolición como agregado grueso**

Robert David Bermúdez Hernández



Universidad de la Costa, CUC

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Civil

Barranquilla, Colombia

2021

**Evaluación de la resistencia a la compresión de un concreto con la sustitución de residuos
de construcción y demolición como agregado grueso**

Robert David Bermúdez Hernández

Tesis presentada como requisito para optar al título de Ingeniero Civil

Asesor: Ph.D. Marian Sabau

Co-asesor: Msc Constanza Helena Martínez Rincón

Universidad de la Costa, CUC

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Civil

Barranquilla, Colombia

2021

Nota de aceptación

Presidente de Jurado

Jurado

Jurado

Barranquilla, _____ 2021

Resumen

Los residuos de construcción y demolición (RCD), debido a sus propiedades, pueden ser reutilizados en la elaboración de concreto, sin embargo, en la mayoría de los casos este no es aprovechado dándoles una inadecuada gestión y disposición final, lo que conlleva a problemas ambientales y sociales. Teniendo en cuenta esta realidad se plantea este estudio que tiene como objetivo evaluar la resistencia a la compresión de un concreto con la sustitución de residuos de construcción y demolición como agregado grueso, para lo cual se seleccionó el RCD más adecuado que para el propósito de este proyecto corresponde al producto de la demolición de un pavimento, que posteriormente fué caracterizado a partir de los ensayos de laboratorio. Seguidamente, se realizaron cinco diseños de mezclas con diferentes proporciones variando los porcentajes de canto rodado (CR) y RCD como agregado grueso de la siguiente manera: 100% RCD, 75% RCD y 25% CR, 50% RCD y 50% CR, 25 % RCD y 75% CR, así como la muestra patrón 100% CR. Luego a cada uno de los diseños se le practicó el ensayo a compresión a las 7, 14 y 28 días. Dentro de los resultados se encontró que el diseño de mezcla en la que tuvo participación el RCD que obtuvo mayor resistencia a la compresión fue el que tenía una proporción de 75% de remplazo de RCD y 25% de CR con un resultado de 4604 psi a los 28 días, además, respecto a la muestra patrón que tuvo una resistencia a los 28 días con 5416 psi. Asimismo, se evidenció que a medida que los días van pasando el concreto mejora su resistencia. Se puede concluir que es posible la fabricación de un concreto de alta resistencia con sustitución de RCD como agregado grueso que puede ser utilizada en construcción de pavimentos y muros de contención de gravedad.

Palabras clave: concreto, medio ambiente, resistencia a la compresión, residuos de construcción y demolición, agregado grueso, muros de contención, pavimentos

Abstract

Construction and demolition waste (RCD), due to its properties can be reused in the preparation of concrete, however, in most cases this is not used, giving it an inadequate management and final disposal, which has led to it being they present numerous environmental and social problems. Taking this reality into account, this study is proposed, which aims to evaluate the compressive strength of a concrete with the substitution of construction and demolition waste as coarse aggregate, for which the collection of the waste that corresponds to this case was carried out. to pavement residues, then the material was washed and crushed to a size of $\frac{3}{4}$ ” and, later, five designs of mixtures were made with different RCD replacement ratios, as well as the standard sample, and then to each of the The designs were subjected to the compression test at 7, 14 and 28 days. Among the results, it was found that the mix design that had the highest resistance to compression was the one that had a proportion of 75% replacement of RCD and 25% of natural coarse aggregate with a result of 4604 psi at 28 days, in addition Regarding the standard sample, this obtained its highest resistance at 28 days with 5416 psi; Likewise, it was evidenced that as the days go by, the concrete improves its resistance

Keywords: concrete, environment, compressive strength, construction and demolition waste

Contenido

	Pág.
Lista de tablas y figuras.....	9
Introducción	12
Capítulo 1. Descripción general del proyecto 	14
1.1. Planteamiento del problema.....	14
1.2. Justificación.....	17
1.3. Objetivos	19
1.3.1. Objetivo general	19
1.3.2. Objetivos específicos	19
Capítulo 2. Marco referencial	20
2.1. Marco conceptual	20
2.1.1. Concreto	20
2.1.2. Residuos de construcción y demolición	20
2.1.3. Tipos de residuos de construcción y demolición (RCD).....	21
2.1.4. Agregados.....	22
2.1.5. Usos de los residuos de construcción y demolición	22
2.1.6. Ventajas del uso de RCD.....	24
2.2. Marco teórico	26
2.2.1. Diseño de mezcla de concreto	26

2.2.2. Resistencia del concreto	26
2.3. Marco legal.....	30
Capítulo 3. Estado del arte	34
Capítulo 4. Metodología	38
4.1. Selección y recolección de los RCD	38
4.2. Procesamiento de los RCD	40
4.3. Diseño de mezcla de concreto.....	42
4.4. Elaboración del concreto.....	48
4.5. Proceso de curado de los cilindros	48
4.6. Ensayo de compresión.....	49
4.5. Análisis de resultados.....	49
Capítulo 5. Caracterización de los agregados a partir de ensayos de laboratorio	50
5.1. Ensayos granulométricos a los agregados.....	50
5.1.1. Agregado fino (arena)	50
5.1.2. Agregado grueso natural (canto rodado)	51
5.1.3. Agregado grueso RCD	53
5.2. Propiedades físicas de los agregados	54
5.2.1. Agregado fino natural (Arena)	54
5.2.2. Agregado grueso natural (canto rodado)	55
5.2.3. Agregado grueso de RCD.....	56

Capítulo 6. Diseño de mezcla.....	58
6.1. Para el agregado de RCD	58
6.2. Para el agregado canto rodado	59
Capítulo 7. Resultados de la resistencia a la compresión.....	62
Capítulo 8. Análisis de resultados	64
Capítulo 9. Conclusiones	66
Capítulo 10. Recomendaciones	68
Referencias	69

Lista de tablas y figuras

Tablas

	Pág.
Tabla 1. Alternativa de uso de los RCD	22
Tabla 2. Resumen de las normativas aplicables al proyecto.....	30
Tabla 3. Valores de asentamiento recomendados para diversas clases de construcción.	43
Tabla 4. Valores recomendados de TMN según el tipo de construcción.....	43
Tabla 5. Valores recomendados para el contenido de aire en el concreto para varios grados de exposición	44
Tabla 6. Requerimientos aproximados de agua de mezclado	45
Tabla 7. Resistencia de diseño cuando no hay datos que permitan determinar la desviación estándar.	45
Tabla 8. Granulometría del agregado fino natural.	50
Tabla 9. Resultados del ensayo granulométrico para el agregado grueso natural.	51
Tabla 10. Resultados del ensayo granulométrico para el agregado grueso de RCD.	53
Tabla 11. Resultado de las propiedades físicas del agregado fino natural (Arena).	54
Tabla 12. Resultado del ensayo en el laboratorio para el agregado fino.	55
Tabla 13. Resultado de las propiedades físicas del agregado grueso natural (canto rodado).	55
Tabla 14. Resultado del ensayo en el laboratorio para el agregado grueso natural (canto rodado).	56
Tabla 15. Resultado de las propiedades físicas del agregado grueso (RCD).....	57
Tabla 16. Resultado del ensayo en el laboratorio para el agregado grueso RCD.	57
Tabla 17. Resumen del diseño mezcla para agregado de RCD.	58

Tabla 18. Resumen del diseño de mezcla para agregado de canto rodado	60
--	----

Figuras

Figura 1. Diagrama de flujo diseño de mezcla.	26
Figura 2. Pasos metodológicos.	38
Figura 3. Ubicación del punto de obtención de los RCD	39
Figura 4: RCD seleccionado para el proyecto.	39
Figura 5: Proceso de trituración de RCD escogido.....	40
Figura 6: Selección preliminar de los RCD, separación de sobre tamaños.	40
Figura 7. RCD pulido y mojado.....	41
Figura 8: Izquierda agregado grueso de RCD y derecha canto rodado.	42
Figura 9. Relación agua – material cementante.	46
Figura 10. Proceso del diseño de mezcla.	48
Figura 11: Cilindros de concreto en piscina para curado.....	49
Figura 12. Curva granulométrica del agregado fino natural.	51
Figura 13. Curva granulométrica del agregado grueso natural.	52
Figura 14. Curva granulométrica del agregado grueso RCD.....	54
Figura 15. Resultados de la resistencia a la compresión.....	62
Figura 16. Resultados de la resistencia a la compresión del diseño de mezcla con agregado de canto rodado.	63

Lista de anexos

	Pág.
Anexo A. Certificados de los ensayos granulométricos.	76
Anexo B. Certificado de los ensayos de compresión.....	77
Anexo C. Cálculo requerido en el diseño de mezcla de RCD	78
Anexo D. Cálculo realizado para el diseño de mezcla con agregado grueso de canto rodado.	83

Introducción

El crecimiento constante de las actividades de construcción, remodelación y demolición en las ciudades genera grandes volúmenes de residuos de concreto, que en la actualidad se han convertido en un problema grave de contaminación ambiental. (Robayo et al., 2014). Los RCD son generalmente una mezcla de materiales sobrantes provenientes de las actividades de construcción, renovación y demolición, incluyendo la limpieza del sitio y la excavación de terrenos (Bazalar y Cadenillas, 2019).

Tanto en Colombia como en el mundo, la generación de RCD va implícita en las actividades constructivas del hombre como parte del desarrollo de infraestructura de prestación de servicios, vivienda, transporte, etc. Genera una preocupación constante el impacto en el medio ambiente al abarcar grandes zonas naturales como espacios para la disposición final de estos residuos. Mientras que en diversos países del mundo, igualmente afectados por el impacto de los RCD, se utiliza una gran parte de estos, en Colombia no se aprovechan, generando problemas con la mala gestión de estos provocando afectaciones ambientales. A pesar de que existen documentos, normas, resoluciones, leyes y guías como la ley 1382 del 2010, decreto 2811 de 1947, resolución 0472 del 2017 y resolución 1482 del 2017 para la gestión adecuada de estos residuos, el control del cumplimiento de estos es ineficiente y los RCD terminan en zonas públicas o botaderos ilegales (Escandón, 2011).

Debido a la problemática presente en la gestión de estos residuos se ha venido implementando una estrategia que permite la recirculación por medio del reciclaje de los residuos para elaborar nuevos diseños de mezclas que cumplan con todos los estándares de

calidad, lo cual además traería beneficios ambientales y económicos en las obras. Teniendo en cuenta esta situación se plantea este estudio que tiene como objetivo evaluar la resistencia a la compresión de un concreto con la sustitución de residuos de construcción y demolición como agregado grueso; siendo así este estudio contribuye con el desarrollo de la construcción sostenible, disminuyendo la huella de carbono ya que pretende demostrar que el uso de agregado grueso reciclados es factible para la elaboración de concreto.

El documento se encuentra organizado por capítulos. En el primero se presenta la descripción general del proyecto que comprende planteamiento del problema, justificación y objetivos, luego en el segundo capítulo se realiza una descripción de los conceptos y de la normatividad aplicable al tema de investigación, en el tercer capítulo se exhibe el estado del arte que permite conocer los avances que ha tenido el tema a lo largo de los años; el cuarto capítulo corresponde a los pasos metodológicos para cumplir con los objetivos propuestos, el quinto la caracterización de los agregados a partir de ensayos de laboratorio, el sexto diseño de la mezcla, séptimo resultados del ensayo de resistencia, octavo análisis de resultados, noveno las conclusiones y finalmente en el capítulo 10 las recomendaciones para futuras investigaciones.

Capítulo 1. Descripción general del proyecto

1.1.Planteamiento del problema

La construcción de obras civiles tiene como uno de sus propósitos satisfacer necesidades básicas de la población acondicionando el entorno y mejorando notablemente la calidad de vida. A pesar de ello, dicho beneficio se ve opacado por el pasivo ambiental que surge del manejo inadecuado de los residuos generados en las diferentes etapas del proceso, partiendo desde la generación de materiales de construcción hasta la ejecución misma de la obra. Siendo esta última el eje central de esta investigación debido a los residuos sólidos que surgen de la ejecución de las actividades que la componen, los cuales se conocen como residuos de la construcción y la demolición (RCD). Estos son materiales de desecho generados durante las diferentes etapas de un proyecto de construcción civil, lo cual incluye estructuras y materiales rechazados, materiales que han sido utilizados y se han deteriorado, e inclusive, aquellos derivados de actividades de excavación y limpieza del lugar al finalizar la obra, entre otros (Blandón et al., 2018).

La mayoría de los agregados para el concreto, son materiales pétreos, que para poder conseguirlos se debe acudir a las diferentes canteras que puedan existir cerca al sitio de emplazamiento de la obra a realizar, esto es lo normal en cualquier proyecto constructivo; sin embargo, las canteras a pesar de beneficiarnos con sus materiales, representan un impacto ambiental nocivo asociado a la sobreexplotación de minerales en cantera y la degradación del entorno que conlleva además a afectaciones sociales y de la salubridad de las comunidades cercanas a la explotación minera (Duran, 2015).

La problemática que se tiene con estos residuos queda en evidencia cuando se producen los vertimientos ilegales en diferentes lugares del espacio urbano de la ciudad, afectado así al tránsito peatonal y vehicular (Castellanos y Quiroga, 2010), generando conflictos en el sistema

de alcantarillado de la ciudad que se ve colmatado por RCD arrastrados por escorrentía al ser tirados en vías públicas, lo que se evidencia en los periodos invernales de la ciudad con canales y vías inundadas causando costos adicionales de mantenimiento de estos sistemas a la administración de la ciudad (Botero, 2003).

En una investigación reciente en Corea del Sur (*Won y Cheng, 2017*) acerca de las causas de los inadecuados procesos de gestión y minimización de los RCD muestra que estas se deben a la mala calidad del diseño, los largos periodos de almacenamiento in-situ, los presupuestos que no incluyen imprevistos para contingencias que se puedan presentar en el manejo de RCD, los tipos y cantidades de RCD generados no se estimaron para cada fase del trabajo, la inadecuada optimización del diseño para reducir la cantidad de materiales usados, la no estandarización y coordinación dimensional de los elementos de construcción durante la fase de diseño, los residuos peligrosos no se separaron y almacenaron en recipientes adecuados claramente etiquetados y mantenidos bajo cubierta y la mala planificación durante el diseño. Asimismo, se ha demostrado que la adopción de decisiones inadecuadas en el diseño y los cambios inesperados en el diseño aumentan el volumen de RCD en un 33% (*Markandeya y Kameswari, 2015*).

Actualmente en la ciudad Barranquilla existe una baja sensibilidad y preparación ambiental de los profesionales de la construcción y ciudadanía en general, hacia el tema de minimizar la generación y manejo integral de los escombros. Durante años las empresas del sector de la construcción en la ciudad han venido ejecutando obras teniendo únicamente como soporte los planos de construcción y las especificaciones técnicas-constructivas que demandan los proyectos, sin tener en cuenta prácticas adecuadas durante el proceso, que permitan disminuir la generación de escombros en dicho sector (*Amaya y Morón, 2017*). Además, en Barranquilla no se cuenta con una escombrera distrital (*Pacheco, Fuentes, Sánchez, y Rondón, 2017*).

Igualmente, el distrito Barranquillero, aunque posee una guía para el manejo integral de los residuos de construcción y demolición elaborada por la Universidad del Norte en conjunto con la empresa Triple A y resoluciones como la 1011 del 2016 y resolución 1482 del 2017 que tienen como objetivo el adecuado manejo de materiales provenientes de residuos generados por las actividades constructivas, no existe un programa que garantice la adecuada disposición u reutilización de los residuos sólidos de construcción. Siendo esta la principal problemática en cuanto al área ambiental es por tal razón que se requiere de un estudio inmediato de esta problemática, con el fin de una mejor distribución y aprovechamiento de estos residuos sólidos de tipo constructivos (Amaya y Morón, 2017).

De acuerdo con lo expuesto surge la siguiente pregunta problema, ¿Qué resistencia a la compresión tendría un concreto con la sustitución de residuos de construcción y demolición como agregado grueso para reutilizado en nuevos proyectos de obras civiles?

1.2. Justificación

La utilización de los residuos de construcción y demolición (RCD) tiene dos enfoques ambientales importantes, el primero ayudar a la reducción de la demanda de recursos naturales y con ello, a reducir el consumo energético en su explotación, disminución en las emisiones atmosféricas, contaminación visual y de ruido y el segundo ayudaría a reducir la cantidad de residuos que son enviados a rellenos sanitarios y escombreras aliviando en gran medida sus capacidades de acopio, prologando así su vida útil.

En Colombia el tema ambiental en la construcción ha tenido gran relevancia en las últimas décadas. Por tanto el gobierno nacional a través del ministerio del medio ambiente está incentivando el uso de materiales, metodologías y técnicas sostenibles, con el ánimo de cuidar los recursos y asegurar que las generaciones futuras disfruten de condiciones óptimas para su desarrollo (Agreda y Moncada, 2015) por lo cual este estudio permite cumplir con estas directrices y con la resolución 472 del 2017 por medio de la cual se reglamenta la gestión integral de residuos generados en las actividades de construcción y demolición. Asimismo, de acuerdo con Pérez (2012) en la actualidad en Colombia estos residuos no reciben ninguna clase de tratamiento por lo cual son utilizados para rellenar huecos presentes en los caminos cercanos a la fuente de generación o simplemente son arrojados a predios baldíos, creando un gran impacto visual y paisajístico; esta situación motiva a realizar esta investigación aportando información de carácter científico que permite solucionar el problema del aumento de RCD convirtiéndolo en materia prima para la fabricación de nuevos materiales, contribuyendo al ahorro de energía y a la creación de sistemas constructivos más eficaces y amigables con el medio ambiente.

Por otra parte, este estudio se justifica desde el punto de vista económico porque el aprovechamiento de estos residuos representa un ahorro económico en las obras constructivas, debido a la incorporación de materiales de desecho al proceso de construcción y a su vez ayuda a la preservación de los recursos naturales, mejorando la imagen de la empresa por medio de la responsabilidad social y ambiental volviéndolas más competitiva (Pérez,2012).

La utilización del concreto con agregado grueso de concreto reciclado permite disminuir el volumen de residuos sólidos a disponer, los costos de transporte y producción, la demanda de material de cantera, las emisiones de CO₂ y por ende la disminución de la huella de carbono. Además, aumenta el ciclo de vida de los materiales de construcción, reduciendo así la cantidad de vertido de residuos. Algunos estados de los Estados Unidos han estimado ahorros de hasta 50-60% usando agregado reciclado en comparación con agregado nuevo (WBCSD, 2009 citado por Bazalar y Cadenillas, 2019).

Por último, en el caso específico del distrito de Barranquilla, el presente estudio representa una base que permitiría el diseño de mezclas de concreto que cumplan con los estándares de calidad con lo cual se podrían utilizar los escombros existentes reduciendo el impacto ambiental en los vertederos, así como la considerable reducción en el uso de agregados naturales, salvaguardando los recursos no renovables.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general.

Evaluar la resistencia a la compresión de un concreto con la sustitución de residuos de construcción y demolición como agregado grueso.

1.3.2. Objetivos específicos.

- Realizar una búsqueda de información sobre los diferentes tratamientos para los RCD.
- Caracterizar los RCD a través de ensayos de laboratorio, para determinar sus propiedades físicas y emplearlas en el diseño de las mezclas de concreto.
- Realizar el diseño de mezcla variando las proporciones de agregado grueso con el 100%, 75%, 50% y 25% de agregado procedente de concreto reciclado y agregado canto rodado.
- Determinar la resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días a la muestra patrón y a los diseños de mezcla con el 100%, 75%, 50% y 25% de RCD.
- Analizar los resultados de la muestra patrón vs. las mezclas con el 100%, 75%, 50% y 25% de concreto reciclado.

Capítulo 2. Marco referencial

2.1. Marco conceptual

A continuación, se desarrollan diferentes conceptos que permiten entender y contextualizar al lector sobre los términos manejados en el presente documento, permitiendo así un mejor entendimiento del tema.

2.1.1. Concreto.

Se le denomina concreto a la combinación de cemento (ocupa entre el 7% y 15% de la mezcla) cuenta con propiedades de cohesión y adherencia y ofrece resistencia a la compresión a la mezcla; por su parte el agua (ocupa un 14% y 18% de la mezcla) es importante porque permite hidratar el cemento y el tercer elemento son los agregados que son materiales inertes, bien sea naturales o artificiales y se divide en fracciones finas como la arena y gruesas como la grava (Sánchez, 2001)

2.1.2. Residuos de construcción y demolición.

Los residuos de construcción y demolición (RCD) son residuos inertes, por lo cual no representan peligro, generados por actividades económicas como la construcción, reforma y demolición de obras civiles en general tales como edificios, espacio público, pavimentos entre otros. Este tipo de residuos es muy atractivo y poco aprovechado, pudiéndose utilizar mediante técnicas de transformación como materia prima de agregados en la fabricación de nuevos productos (Guzmán y Soler, 2019).

2.1.3. Tipos de residuos de construcción y demolición (RCD).

A continuación, se presenta su clasificación según lo establece la Guía para la elaboración del Plan de Gestión de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) de la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá, Colombia (2015):

RCD Aprovechables

- Residuos pétreos tales como: Concretos, cerámicos, ladrillos, arenas, gravas, cantos, bloques, fragmentos de roca, baldosín y mortero.
- Residuos finos no expansivos como: Arcillas (caolín), limos y residuos inertes, poco o no plásticos.
- Residuos finos expansivos ejemplos: Arcillas (montmorillonitas) y lodos inertes con gran cantidad de finos altamente plásticos, entre otros.
- Residuos no pétreos siendo los principales los siguientes: Plásticos, PVC, maderas, cartones, papel, siliconas, vidrios, cauchos, etc.
- Residuos de carácter metálico tales como: Acero, hierro, cobre, aluminio, estaño y zinc.
- Residuos orgánicos vegetales o de tierra negra.

RCD no aprovechables

Residuos peligrosos, es decir: desechos de productos químicos, emulsiones, alquitrán, pinturas, disolventes orgánicos, aceites, resinas, plastificantes, tintas, betunes, barnices, tejas de asbesto, escorias, plomo, cenizas volantes, luminarias, desechos explosivos, etc.

2.1.4. Agregados.

Son aquellos que provienen de la roca, habitualmente se encuentran en forma de bloques, losetas o fragmentos de distintos tamaños, principalmente en la naturaleza, aunque de igual modo existen otros que son procesados e industrializados por el ser humano. Los agregados pétreos se dividen en:

Finos: Se le da comúnmente el nombre de arena y se define como partículas de arena, rocas trituradas, o materiales similares con un diámetro ligeramente inferior a 4 mm. Las especificaciones para el aditivo fino exigen cierta variedad en los tamaños de las partículas. El agregado fino debe consistir en partículas fuertes, libres de arcilla, materia orgánica, sedimentos, mica u otras sustancias perjudiciales.

Gruesos: El que se usa con mayor frecuencia es la grava. El agregado grueso puede componerse de piedras trituradas, escorias de altos hornos y otras partículas duras similares, que varían en tamaño de 10 mm a 75 mm.

2.1.5. Usos de los residuos de construcción y demolición.

En la tabla 1, a partir de los desechos aprovechables se pueden dar diferentes usos, a continuación, se presenta una tabla donde se pueden observar algunos de ellos:

Tabla 1

. Alternativa de uso de los RCD

Residuos	Alternativa de uso
Concretos	Reutilizar como masa para rellenos
	Reutilizar como suelo en carreteras

	Reciclar como grava suelta
	Reciclar para producción de morteros y cemento
	Reciclar como granulado
	Reciclar como adoquín
Cerámico	Reciclar como fachada
	Reciclar para acabados
	Reutilizar como masa para rellenos
Asfalto	Reciclar como asfalto
	Reutilizar para aplicación en otros productos
Metales	Reciclar como aleación
	Reutilizar para casetones, vallados y linderos
Madera	Reciclar para tableros y aglomerados
Vidrio	Reciclaje de vidrio
Pétreos	Reutilizar como áridos finos y gruesos
Plásticos	Reciclar como plásticos
Tejas, bloques entre otros	Reciclar como bases para nuevos productos
Tierra de excavación	Reutilizar como relleno y recuperación de talud Estabilización de suelos
Elementos arquitectónicos	Reutilizar como nuevos productos

Fuente: Alcaldía Mayor de Bogotá, 2015.

2.1.6. Ventajas del uso de RCD.

Es necesario hacer una evaluación de los beneficios globales derivados del reciclaje de concreto para el desarrollo sostenible. El concreto tiene un alto impacto medioambiental con respecto a los insumos, específicamente en la fase de producción de cemento. El transporte y envío en todas las etapas de producción es la segunda fuente más importante de los impactos (Consejo Mundial Empresarial para el Desarrollo Sostenible, 2009). Entre las ventajas del uso del RCD se encuentran:

1. El uso de RCD minimiza los residuos de concreto; este material reciclado puede ser utilizado dentro de la misma área de generación, esto puede conducir a una disminución en el consumo de energía a partir del transporte y la producción de agregados. Esto puede ayudar a mejorar la calidad del aire mediante la reducción de emisiones de las fuentes de transporte (Federal Highway Administration, 2004).
2. Además de los beneficios para el medio ambiente, utilizar concreto reciclado también puede tener beneficios económicos, teniendo en cuenta la situación y las condiciones locales:
 - Cercanía y cantidad de agregados naturales disponibles.
 - El costo de enviar a los sitios de disposición final muchas veces puede ser superior al costo de separar y vender los residuos de concreto, de un sitio de construcción a un agente reciclador (Forster, 1986).
3. La reutilización de los escombros de la demolición de concreto reduce cantidades antiestéticas de escombros de concreto, de los que se reduce los impactos al paisaje (Foster, 1986).

4. La durabilidad del concreto reciclado significa que su larga vida útil puede presentar ventajas en sostenibilidad frente a otros materiales de construcción (Guacaneme, 2015).

2.2. Marco teórico

2.2.1. Diseño de mezcla de concreto.

Normalmente los diseños de mezcla de concreto son guiados o realizados teniendo en cuenta los pasos presentados en la figura 1, ver a continuación.

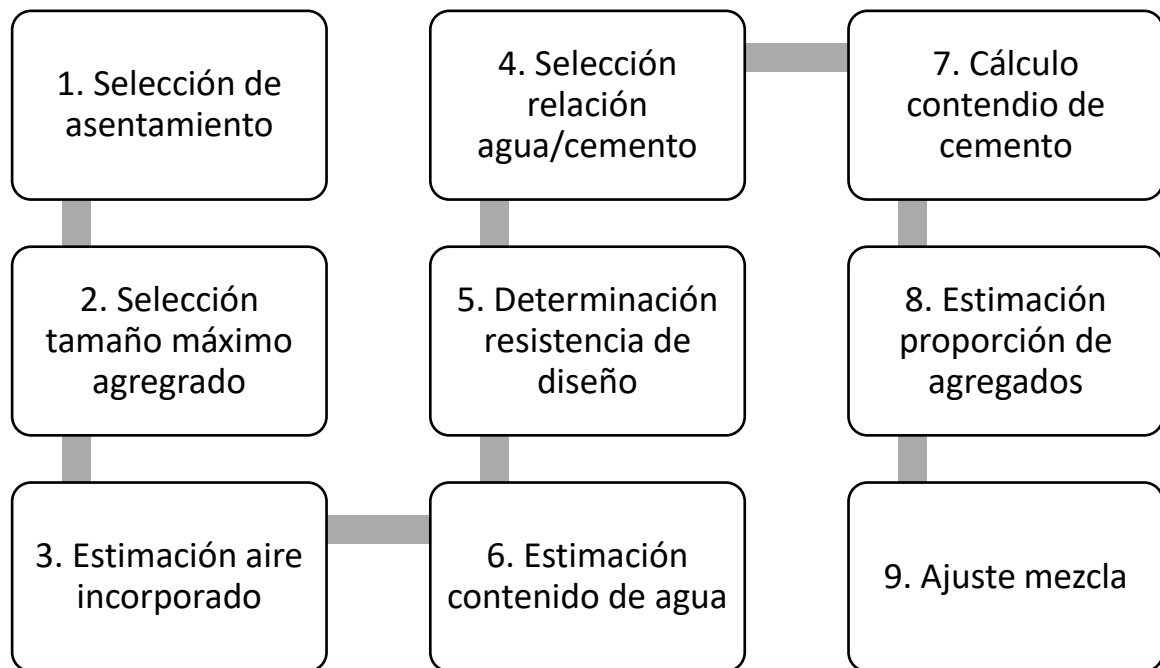


Figura 1. Diagrama de flujo diseño de mezcla.
Fuente: Tomado y adaptado de Zuluaga (2013).

2.2.2. Resistencia del concreto.

La resistencia mecánica del concreto en estado endurecido depende de numerosas y complejas variables como la composición química del cemento, su finura, la relación agua/cemento, la calidad intrínseca de los agregados tanto finos como gruesos, las condiciones de temperatura y humedad del ambiente y la eficiencia del curado. Por su naturaleza, el concreto es un material discontinuo y heterogéneo que arroja resultados variables en cuanto a su calidad y resistencia, debido a la compleja interacción de sus fases constituyentes como la resistencia de la

pasta hidratada (generalmente llamada matriz), la resistencia individual de las partículas del agregado y la relación existente entre la interfaz matriz–agregado (Rosero, 2019).

En consecuencia, a partir de la teoría encontrada en las diferentes investigaciones consultadas, se definen las propiedades mecánicas del concreto reciclado en estado endurecido.

Resistencia a la compresión

A continuación, Maldonado y Palomino (2018) definen la resistencia a la compresión de la siguiente manera:

“La resistencia a la compresión es una característica mecánica principal del concreto. Se puede definir como la capacidad que tiene para soportar una carga en un área determinada, y se expresa en términos de esfuerzo, la mayoría de las veces en kg/cm², MPa y libras por pulgada cuadrada (Psi)” (p. 20-21).

Así mismo, Maldonado y Palomino (2018) sostiene que el ensayo de resistencia a la compresión emplea la teoría de Slater “Se puede emplear para saber la resistencia a la compresión del concreto a edad de 28 días, conociendo la resistencia a la compresión a la edad de 24 horas, 7 días y 14 días, en unidades de Mega pascales (MPa)”. (p. 21).

Maldonado y Palomino (2018) afirma que “la ecuación para determinar la resistencia a la compresión (f'_c) teórica, a la edad de 28 días, conociendo la resistencia a la compresión a la edad de 24 horas ($f'_{c24 \text{ horas}}$)” (p. 21). Observar ecuación 1.

$$f'_{c28} = 6,56 * f'_{c24 \text{ horas}}^{0,82} \quad (1)$$

Maldonado y Palomino (2018) afirma que “la ecuación para determinar la resistencia a la compresión (f'_c) teórica, a la edad de 28 días, conociendo la resistencia a la compresión a la edad de 7 días (f'_{c7}). (p. 21). Observar ecuación 2.

$$f'_{c28} = 2,25 * f'_{c7}{}^{0,93} \quad (2)$$

Y para determinar la resistencia a la compresión (f'_c) teórica, a la edad de 28 días, conociendo la resistencia a la compresión a la edad de 14 días (f'_{c14}) se utiliza la ecuación 3 (Palomino y Maldonado, 2018, p. 21).

$$f'_{c28} = f'_{c14} + 1,45 * f'_{c14}{}^{0,5} \quad (3)$$

De acuerdo con Maldonado y Palomino (2018):

“Para determinar la resistencia a la compresión se utilizan probetas cilíndricas elaboradas en moldes especiales que tienen 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. Las normas NTC 550 y 673 son las que rigen los procedimientos aceptados para la elaboración de los cilindros y ensayo de resistencia a la compresión respectivamente” (p. 21).

Resistencia a la flexión

Resistencia a la flexión o módulo de rotura y debido a su naturaleza, el concreto hidráulico es frágil ante los esfuerzos a flexión, por esta razón esta propiedad mecánica generalmente no se tiene en cuenta en el diseño de las estructuras verticales convencionales. “La tracción tiene que ver con el agrietamiento del concreto, a causa de la contracción inducida por el fraguado o por los cambios de la temperatura” (Sánchez, 1996), cumpliendo estos factores se generan esfuerzos internos de flexión (Palomino y Maldonado, 2018).

Para calcular el módulo de rotura (MR) teórico se emplea la ecuación 4, cuando se conoce la resistencia a la compresión a la edad de 28 días (f'_{c28}).

$$MR_{28} = 0,392 * f'_{c28} \quad (4)$$

2.3. Marco legal

A continuación, de manera sintetizada se referencia el marco normativo ambiental aplicable a la gestión y reutilización de escombros y la normativa técnica empleada en la caracterización física y mecánica de los agregados y concretos (Tabla 2).

Tabla 2.

Resumen de las normativas aplicables al proyecto

NORMATIVIDAD

DESCRIPCIÓN

Constitución política de Colombia

A través de la carta magna se incluyen las disposiciones ambientales en la legislación colombiana. En sus artículos 79 y 80 señala la obligación del Estado de prevenir los factores de deterioro, garantizar el medio ambiente sano y promover el desarrollo sostenible.

Ley 99 de 1993

Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental y el SINA. Mediante esta ley se logra concretar en un solo documento las normas y principios que influyen en el control y formulación de

	políticas ambientales a escala nacional (Congreso de la República, 1993) Por medio de la cual se instaura en el territorio nacional la aplicación del comparendo ambiental a los infractores de las normas de aseo, limpieza y recolección de escombros. Establece en su artículo 102 el manejo de escombros, donde dice que cada municipio determinará el lugar o lugares autorizados para la disposición final de los escombros que se produzcan en su jurisdicción. El incumplimiento de la norma se sancionará con la multa de 30smly.
Ley 1259 del 2008	
Ley 1383 del 2010	Establece ciertas reglas para el manejo de los residuos sólidos, basuras, desechos y desperdicios. Además, prohíbe descargar, sin autorización, los residuos, basuras y desperdicios, y en general, desechos que deterioreen los suelos o, causen daño, molestia al individuo o núcleos humanos “Recolección de escombros. Es responsabilidad de los productores de

Decreto 1713 de 2002

escombros su recolección, transporte y
disposición en las escombreras autorizadas.

El Municipio o Distrito y las personas
prestadoras del servicio de aseo son
responsables de coordinar estas actividades
en el marco de los programas establecidos
para el desarrollo del respectivo Plan de
Gestión Integral de Residuos Sólidos,
PGIRS”.

Reglamenta el sector de Vivienda, Ciudad
y Territorio, señala las definiciones
respecto al servicio público de aseo, y en
relación con la definición de RCD.

Decreto 1077 del 2015

Establece el proceso de recolección de
RCD, definiendo que el generador es
responsable por el manejo y disposición, y
que el municipio o distrito deberá
coordinar con las personas del servicio
público de aseo la ejecución de estas
actividades y pactar libremente su
remuneración.

Por medio de la cual se regula el cargue,
descargue, transporte, almacenamiento y

Resolución 541 de 1994	disposición final de escombros, materiales, elementos, concretos y agregados sueltos, de construcción, de demolición y capa orgánica, suelo y subsuelo de excavación Esta rige a nivel nacional, en la cual se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición RCD y se dictan otras disposiciones. Por medio de la cual se reglamenta el registro de generadores y gestores en el marco de la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición- RCD- en el distrito de Barranquilla.
Resolución 0472 del 2017	
Resolución 1482 del 2017	

Fuente: Elaboración propia

Capítulo 3. Estado del arte

El tema de aprovechamiento de RCD ha sido muy estudiado, pese a que este es un tema relativamente nuevo, por lo cual a continuación se describen diferentes investigaciones internacionales, nacionales y locales de carácter científico que permiten conocer el estado actual del tema en estudio.

El estudio de Vargas (2019) evidencia que en México desde el año 2013 se empezaron a tomar acciones contundentes sobre los RCD, de esta manera por ley las empresas u operadores deben cumplir con la formulación de un Plan de Manejo de RCD estipulado así en la norma NOM-161-SEMARNAT-2011 y desde el 2004 en México implementaron una planta para el reciclaje de este tipo de residuos. Chile, por su parte, es un país en el que los RCD ocupan el primer lugar en generación de residuos, el estudio también deja en evidencia que son más los vertederos ilegales para la disposición final de RCD que los legales contribuyendo así a la generación de una problemática ambiental por el impacto que estos generan. El gobierno de Bolivia, específicamente en la ciudad de Ema cruz, cuenta con una planta trituradora de escombros con una capacidad de acción de 50 Ton / hora, en donde se separa los escombros del metal que contienen para su reutilización. En este país una parte los residuos de RCD son empleados para realizar rellenos para así consolidar los terrenos, claro está que previamente se realiza una clasificación adecuada para que estos no vayan contaminados.

De las ciudades europeas en España, en el periodo comprendido entre el 2011 a 2015 el 70% de los residuos son tratados de manera adecuada por las autoridades autorizadas para realizar dicha gestión, además, en el periodo de tiempo mencionado se redujo a un 30% la producción incontrolada de estos residuos. La fabricación de áridos reciclados procedentes del tratamiento de RCD en los últimos años sitúa a España como uno de los países avanzados

tecnológicamente a nivel mundial en su tratamiento, así como los avances normativos técnicos y legislativos, y los numerosos proyectos de innovación en este campo, demuestran que es posible lograr el cumplimiento de los objetivos de la directiva siempre que exista una voluntad directa de todos los agentes implicados en el sector de la construcción.

Por otra parte, Bélgica, se ha convertido en el mayor exponente de la gestión de residuos en Europa, ya que posee la tasa de desviación más alta de ese continente –casi tres cuartos de los residuos domésticos y RCD que se producen en la región son reutilizados, reciclados o transformados y ha logrado estabilizar la generación de residuos. Gracias a políticas regionales de gran alcance que están muy bien coordinadas con los programas locales, la gestión de residuos ha permanecido como una estrategia descentralizada, eficiente y muy efectiva (Allen, 2015).

En Perú, Collantes y Eslava (2018) realizaron una investigación que tuvo como propósito determinar el porcentaje óptimo de concreto reciclado que debe sustituir al agregado grueso en el diseño de una mezcla convencional para conformar concreto permeable. Las granulometrías evaluadas del concreto reciclado pasan la malla N°4 y retiene en la malla N°10; utilizando porcentajes de reemplazo de 30, 35, 40, 45, y 50%, con una dosificación de cemento Tipo MS (moderada resistencia a los sulfatos), agregado grueso y relación agua / cemento de 0.45. Se realizó el ensayo de asentamiento del concreto en estado fresco, bajo la norma ASTM C143. Además, se hicieron tres ensayos para el concreto en estado endurecido: la resistencia a la compresión según la norma ASTM C39, la abrasión haciendo uso de la norma ASTM C1747 y la permeabilidad rigiéndonos a la norma ACI 522R-10. Las probetas para los ensayos del concreto en estado endurecido fueron ensayadas a edades de 28 días de curado, a excepción del ensayo de resistencia a la compresión, en el cual también se ensayaron a edades de 7 días de curado. El

diseño óptimo del concreto permeable no estructural con concreto reciclado se logró con un porcentaje de 40%, presentando la máxima resistencia a compresión y una mejora de 36%, con respecto a la resistencia de diseño. Además de tener óptimas propiedades de asentamiento, abrasión y permeabilidad.

En Boyacá, Pérez (2012) en su artículo examina la posibilidad de utilizar triturado de ladrillo como agregado grueso en la elaboración de concreto. Para esto fue sustituido el agregado natural grueso por triturado de ladrillo en diferentes proporciones (0, 10, 20 y 30%). Se analizaron las propiedades químicas del ladrillo reciclado, así como las propiedades mecánicas del concreto endurecido (flexión y compresión a los 28 días). Los resultados del ensayo indican la viabilidad de utilizar triturado de ladrillo reciclado como agregado grueso en la elaboración de concreto siempre y cuando este no supere el 30% del agregado natural grueso.

En Barranquilla, los investigadores Castillo, Chimá y Rondón (2019) realizaron un estudio que tuvo como objetivo evaluar la prefactibilidad del concreto sostenible usando agregado grueso reciclado procedente de un pavimento rígido de Barranquilla, para lo cual se desarrollaron 3 etapas. Primero, estudio de mercado que comprende un diagnóstico mediante encuestas y entrevistas aplicadas a un grupo de obras civiles seleccionadas y a algunas de las entidades involucradas en la gestión de los residuos de la ciudad, el cual se complementa con un mapeo geográfico que permite conocer el nivel de concentración de los RCD encontrados de acuerdo a con un ruteo establecido por localidades. Segundo, viabilidad técnica conformada por una caracterización inicial de los materiales a utilizar, la aplicación de una técnica de mejoramiento experimental (TME) y, el diseño y elaboración de 4 tipos de mezclas definidos según el porcentaje de reemplazo de AGN por el AGR en volúmenes de 0%, 10%, 50% sin TME y 50% con TME para la fabricación de 24 especímenes cilíndricos ensayados a compresión a la

edad de 28 días. Tercero, evaluación económica mediante el análisis de costos unitarios del concreto sostenible vs. un concreto convencional. Al finalizar este estudio se determina si el concreto sostenible propuesto en la investigación es viable según los parámetros estudiados y las normativas colombianas vigentes (ley 1382 del 2010, decreto 2811 de 1947, resolución 0472 del 2017 y resolución 1482 del 2017).

Capítulo 4. Metodología

A continuación, se mencionan y describen las actividades que permitieron el desarrollo de los objetivos planteados en este estudio.



Figura 2. Pasos metodológicos.
Fuente: elaboración propia.

4.1. Selección y recolección de los RCD

Se hizo un recorrido por diferentes puntos de la ciudad en los cuales se tenía conocimiento de la existencia de obras civiles y en donde lógicamente se producía RCD; teniendo en cuenta que, en la ciudad de Barranquilla, la construcción y remodelación de las vías son proyectos que generan gran cantidad de residuos, además debido a su dureza se decidió tomar los residuos generados en esta actividad como materia prima para el desarrollo o elaboración del concreto de tal manera que este proyecto generará un gran impacto en este sector. A continuación, se presenta el lugar ubicado en la nueva circunvalación de la prosperidad

específicamente a la altura de la entrada del barrio La Playa en el cual se obtuvo los RCD.
(Figura 3 y 4).



Figura 3. Ubicación del punto de obtención de los RCD
Fuente: elaboración propia.

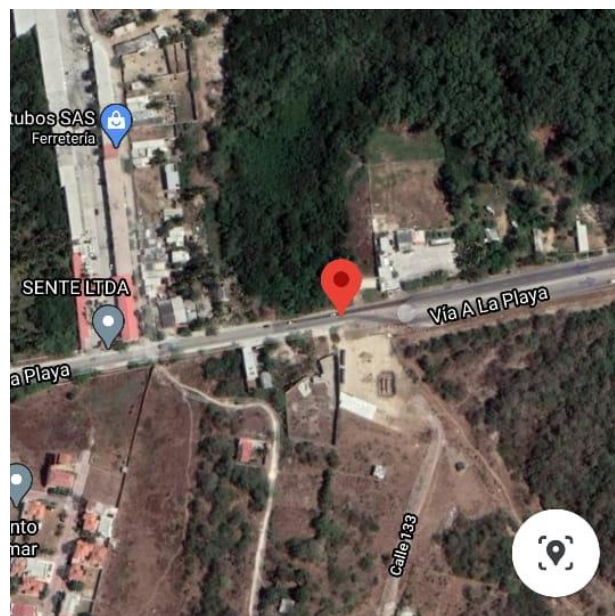


Figura 4: RCD seleccionado para el proyecto.
Fuente: Elaboración propia.

4.2. Procesamiento de los RCD

Trituración primaria y secundaria

El procesamiento se realizó teniendo en cuenta el criterio de Castillo, Chimá y Rondón (2019) los cuales proponen que una vez seleccionada la materia prima se someta la misma a un proceso de trituración primaria y secundaria con el fin de disminuir el tamaño de los agregados de RCD buscando que los mismos lleguen a tener un tamaño menor a 1" (25.4 mm). A continuación, se presenta este proceso (figura 5 y 6).



*Figura 5: Proceso de trituración de RCD escogido.
Fuente: elaboración propia.*



*Figura 6: Selección preliminar de los RCD, separación de sobre tamaños.
Fuente: elaboración propia.*

Tamizaje de los RCD

Teniendo en cuenta el criterio de Castillo, Chimá y Rondón (2019) se realizó el proceso de tamizaje de los residuos con el fin de determinar cuáles cumplían con el tamaño que se quería obtener, y los que no se descartaron.

Pulidora de RCD

Tomando en consideración el criterio de Castillo, Chimá y Rondón (2019) estos residuos se pulieron con el fin de desprender la mayor cantidad de mortero residual y finos que el árido pueda contener, y segundo, buscar que el agregado adquiriera una forma más redondeada. (Figura 7).



*Figura 7. RCD pulido y mojado.
Fuente: elaboración propia.*

Lavado del RCD

Una vez pulido, se lavó el material con agua a presión logrando retirar gran cantidad de mortero residual desprendido del punto anterior y cualquier contenido de finos que el RCD presente. El agregado resultante del proceso de lavado se presenta en la Figura 7 (izquierda). A la

derecha el canto rodado; este último se usará en una proporción del 100% para generar la muestra patrón.



Figura 8: Izquierda agregado grueso de RCD y derecha canto rodado.
Fuente: elaboración propia.

4.3. Diseño de mezcla de concreto

Para este estudio, el diseño de mezcla de concreto se realizará mediante la norma A.C.I 211.1 que, a su vez, está basada en la norma ASTM C33, donde se hace referencia a las especificaciones granulométricas. A continuación, se definen los pasos a seguir para la mezcla de concreto:

- Elección de la resistencia promedio (f'_{cr}): La resistencia promedio del concreto a diseñar es de 6000 PSI.
- Elección del asentamiento: Los valores del asentamiento recomendados son los mostrados en la tabla 3 y se usan cuando el método de compactación utilizado es la vibración (para

otros métodos se deben sumar 2.5 cm a los valores de la tabla 3 como es el caso en esta investigación).

Tabla 3

Valores de asentamiento recomendados para diversas clases de construcción.

Asentamiento (cm)	Consistencia (Tipo de concreto)	Grado de Trabajabilidad	Tipo de estructura y condiciones de colocación
0 – 2.0	Muy seca	Muy pequeño	Vigas o pilotes de alta resistencia con vibradores de formaleta.
2.0 – 3.5	Seca	Pequeño	Pavimentos vibrados con máquina mecánica
3.5 – 5.0	Semi-seca	Pequeño	Construcciones en masas voluminosas. Losas medianamente reforzadas con vibración. Fundaciones de concreto simple. Pavimentos con vibradores normales.
5.0 – 10.0	Media	Medio	Losas medianamente reforzadas y pavimentos, compactados a mano. Columnas, vigas, fundaciones y muros, con vibración.
10.0 – 15.0	Húmeda	Alto	Secciones con mucho refuerzo. Trabajos donde la colocación sea difícil. Revestimiento de túneles. No recomendable para compactarlo con demasiada vibración

Fuente: Nino y Hernández (2010)

- Elección Tamaño Máximo Nominal (TMN)

Se trata de elegir una adecuada granulometría, tener una masa más compacta y con menos vacíos. La tabla 4 muestra los valores recomendados del TMN para los diferentes tipos de construcciones como se muestra a continuación:

Tabla 4. Valores recomendados de TMN según el tipo de construcción.

DIMENSIÓN MÍNIMA DEL ELEMENTO (cm)	TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL EN MM (PULGADAS)			
	MUROS REFORZADOS, VIGAS Y COLUMNAS	MUROS SIN REFUERZO	LOSAS MUY REFORZADAS	LOSAS SIN REFUERZO O POCO REFORZADAS
6-15	12(1/2") - 19(3/4")	19(3/4")	19(3/4") - 25(1")	19(3/4") - 38(1 1/2")
19-29	19(3/4") - 38(1 1/2")	38(1 1/2")	38(1 1/2") - 76(3")	
30-74	38(1 1/2") - 76(3")	76(3")	38(1 1/2") - 76(3")	76(3")
75 O MAS	38(1 1/2") - 76(3")	152(6")	38(1 1/2") - 76(3")	76(3") - 152(6")

Fuente: Nino y Hernández (2010)

- Estimación contenido aire

El contenido de aire beneficia la manejabilidad y la cohesión de la mezcla. La tabla 5 muestra los valores recomendados para estimar el contenido de aire de la mezcla, teniendo como base las referencias que se especifican en la norma ACI 318 S-08.

Tabla 5. Valores recomendados para el contenido de aire en el concreto para varios grados de exposición

AGREGADO GRUESO		PORCENTAJE PROMEDIO APROXIMADO DE AIRE ATRAPADO	PORCENTAJE PROMEDIO TOTAL DE AIRE RECOMENDADO PARA LOS SIGUIENTES GRADOS DE EXPOSICIÓN		
PULGADAS	mm		SUAVE	MEDIANO	SEVERO
3/8	9,51	3,0	4,5	6,0	7,5
1/2	12,50	2,5	4,0	5,5	7,0
3/4	19,10	2,0	3,5	5,0	6,0
1	25,40	1,5	3,0	4,5	6,0
1 1/2	38,10	1,0	2,5	4,5	5,5
2	50,8	0,5	2,0	4,0	5,0
3	76,1	0,3	1,5	3,5	4,5
6	152,4	0,2	1,0	3,0	4,0

Fuente: Nino y Hernández (2010)

- Estimación cantidad de agua de mezclado

La demanda de agua en las mezclas se debe a aspectos de manejabilidad, adherencia e hidratación. La tabla 6 muestran el requerimiento de agua en la mezcla, que está en función del asentamiento y el TMN.

Tabla 6*Requerimientos aproximados de agua de mezclado*

Revenimiento (Asentamiento) (mm)	Agua, Kilogramos por metro cubico de concreto, para los tamaños de agregados indicados*							
	9.5mm	12.5mm	19mm	25mm	37.5mm	50mm**	75mm**	150mm**
Concreto sin aire incluido								
25 a 50	207	199	190	179	166	154	130	113
75 a 100	228	216	205	193	181	169	145	124
150 a 175	243	228	216	202	190	178	160	-
Cantidad aproximada de aire trapado en un concreto sin aire incluido, porcentaje.	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
Concreto con aire incluido								
25 a 50	181	175	168	160	150	142	122	107
75 a 100	202	193	184	175	165	157	133	119
150 a 175	216	205	197	184	174	166	154	-
Promedio del contenido de aire total recomendado, para el nivel de exposicion, porcentaje †								
Exposicion leve	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0
Exposicion moderada	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5	3.0
Exposicion severa	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0

*Estas cantidades de agua de mezcla son para utilizarse en el calculo de los contenidos de cementos en las mezclas de pruebas.

Estas cantidades son maximas para agregados gruesos razonablemente angulares con granulometria dentro de los limites de las

**El revenimiento (asentamiento) del concreto conteniendo agregado mayor que 37.5mm se basa en el ensayo de revenimiento

realizado despues de la remocion de las particulas mayores que 37.5mm, a traves de cribado humedo.

† Las especificaciones de obra deben especificar un contenido de aire en el concreto entregado en la obra dentro de -1+2 puntos

porcentuales del valor anotado en la tabla para las exposiciones moderada y severa.

Adaptada del ACI 211.1 y del ACI 318. Hover (1995) presenta esta informacion en la forma de grafico.

Fuente: Tomado y adaptado de Kosmatka y Panarese (1992).

- Resistencia requerida de diseño

Como no se tiene registro de pruebas de resistencias en donde se usaron materiales y condiciones similares, se determina la resistencia de diseño. En la Tabla 7 se selecciona dicha resistencia y como la resistencia es más de 350 kg/cm^2 se escoge:

$$f'_c + 100$$

Tabla 7

Resistencia de diseño cuando no hay datos que permitan determinar la desviación estándar.

Resistencia específica $f'c$ (kg/cm ²)	Resistencia de diseño de la mezcla $f'c$ (kg/cm ²)
Menos de 210	$f'c + 70$
de 210 a 350	$f'c + 85$
Mas de 350	$f'c + 100$

Fuente: De Guzmán Sánchez, 2001.

- Elección relación agua/cemento (a/c)

Este es el factor más importante en el diseño de mezclas de concreto, porque con él se pueden determinar los requisitos de resistencia, durabilidad, permeabilidad y acabado. De la figura 9 se puede obtener la relación agua cemento, para ello se selecciona la resistencia de diseño a los 28 días y se intercepta la línea correspondiente a concreto sin aire incluido, lo que da como resultado una relación A/C de 0.3.

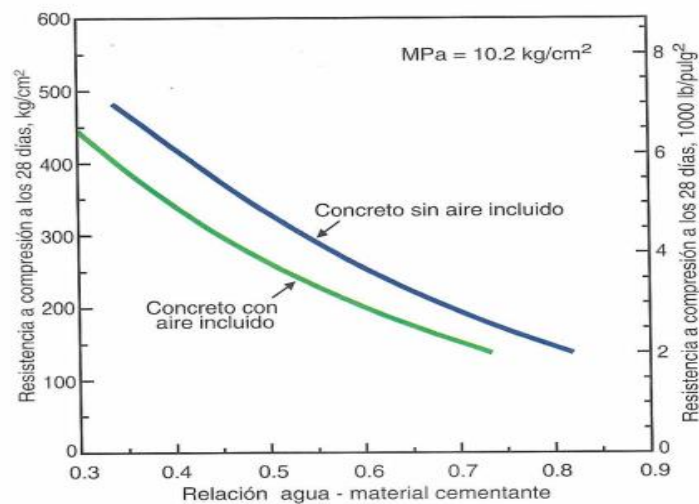


Figura 9. Relación agua – material cementante. Fuente: Kosmatka y Panarese, 1992.

- Contenido de cemento

Para el cálculo del cemento se utilizará la ecuación 1 que relaciona el agua y la relación agua/cemento (a/c), cuyos valores ya se han calculado en los dos pasos anteriores.

$$C = \frac{\text{Contenido de agua}}{\text{Relacion a/c}} \quad (1)$$

- Granulometría de los agregados grueso y fino

Para la caracterización de los agregados se utilizó el método de Fuller – Thomson donde se obtiene los módulos granulométricos y el porcentaje de agregado grueso y fino en la mezcla.

- Volumen de los agregados gruesos y finos

se determina el volumen de los agregados en la mezcla de concreto, para ello restamos 1 m³ de concreto, que es el volumen de diseño, menos el volumen de cemento y el volumen de agua. como se muestra en la ecuación 2:

$$V_{\text{Agregados}} = 1 - V_{\text{Cemento}} - V_{\text{Agua}} \quad (2)$$

Para este estudio, se realizarán diferentes diseños de mezcla teniendo en cuenta las siguientes proporciones de RCD:

- 100% de agregado grueso canto rodado (muestra patrón).
- 100% agregado grueso de RCD.
- 75% agregado grueso canto rodado y 25% agregado grueso RCD.

- 50% agregado grueso canto rodado y 50% agregado grueso RCD
- 25% agregado grueso canto rodado y 75% agregado grueso RCD.

4.4. Elaboración del concreto

En la Figura 10 se presenta el proceso de fabricación de la mezcla, en primer lugar, la mezcla de los elementos (agua, grava, RCD, canto rodado), luego el proceso de vibrado y, finalmente, la mezcla dentro del molde de cilindro con medidas de 30 cm de alto y 15 cm de diámetro.



Figura 10. Proceso del diseño de mezcla. Fuente: elaboración propia.

4.5. Proceso de curado de los cilindros

Luego de este proceso, los cilindros se llevaron hasta las piscinas para que iniciará el proceso de curado. (Figura 11).



Figura 11: Cilindros de concreto en piscina para curado. Fuente: elaboración propia.

4.6. Ensayo de compresión

Se elaboraron los especímenes cilíndricos de concreto siguiendo los lineamientos de la norma ICONTEC – 504 donde se establecen los procedimientos para la elaboración y curado de los cilindros con los cuales se mide la resistencia a la compresión del concreto (f'_c) a los 7, 14 y 28 días.

4.5. Análisis de resultados

Se realizó una comparación de los resultados de las muestras con las diferentes proporciones de agregados RCD y canto rodado realizados con un mismo diseño, para verificar la idoneidad de los RCD para el empleo de concretos.

Capítulo 5. Caracterización de los agregados a partir de ensayos de laboratorio

A continuación, se presentan los resultados de cada una de las actividades planteadas en la metodología en el orden los ensayos granulométricos de los agregados y los ensayos de compresión a las 7, 14 y 28 días.

5.1. Ensayos granulométricos a los agregados

5.1.1. Agregado fino (arena).

A continuación, en la Tabla 8 se presentan los resultados obtenidos tras la aplicación del ensayo de granulometría para el agregado fino natural (arena) empleado en la fabricación del concreto.

Tabla 8

Granulometría del agregado fino natural.

Tamiz	Tamiz (mm)	Peso Ret (g)	% Retenido	% Pasa	NORMA ICONTEC 174
3/8 "	9.51	0.0	0.00	100.00	100.0
No 4	4.75	25.3	1.11	98.89	95-100
No 8	2.38	73.5	3.22	95.67	80-100
No16	1.19	337.8	14.79	80.88	50-85
No 30	0.595	587.6	25.73	55.15	25-60
No 50	0.297	799.3	35.00	20.15	10-30
No 100	0.149	273.8	11.99	8.16	2-10
No 200	0.075	170.8	7.48	0.68	0-0
Fondo		15.6	0.68	0.00	
Suma Tamiz		2268.1			

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la norma ICONTEC 174 el agregado fino cumple o se encuentra dentro de los rangos normales establecidos teniendo en cuenta que el agregado no pasa del 8,9% de los tamices. El módulo de finura tuvo un valor de 2.41. Lo anterior también se puede observar en la figura 12 denominada curva granulométrica.

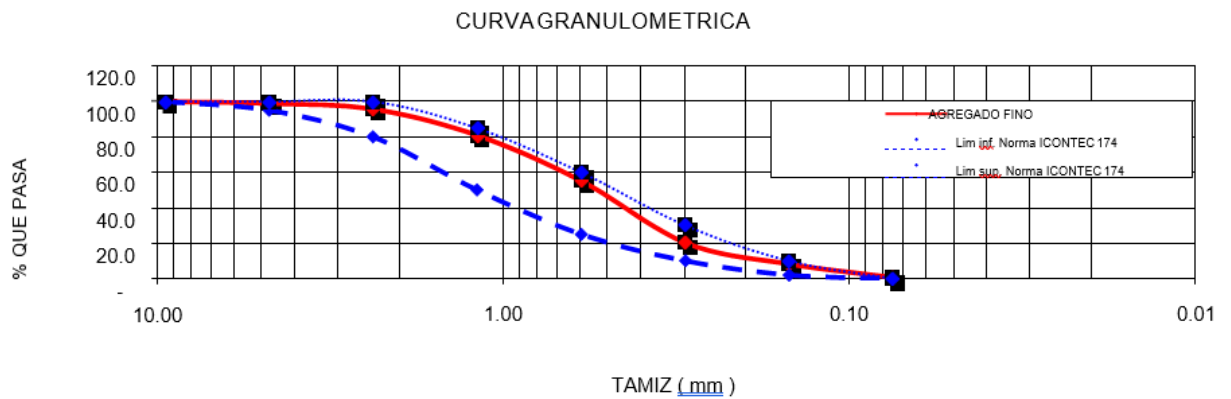


Figura 12. Curva granulométrica del agregado fino natural. Fuente: elaboración propia.

5.1.2. Agregado grueso natural (canto rodado)

En la Tabla 9 se pueden observar los resultados del ensayo de granulometría para el agregado grueso natural.

Tabla 9

Resultados del ensayo granulométrico para el agregado grueso natural.

Tamiz	Peso Ret.	% Retenido	% Pasa	Tamiz (mm)	NORMA
					ICONTEC 174
3"	0.0	0.00	100.00	76.1	
2"	0.0	0.00	100.00	50.8	100
1 1/2"	0.0	0.00	100.00	38.1	95-100
1"	531.6	20.94	79.06	25.4	
3/4"	428.3	16.87	62.18	19.0	35-70

1/2"	619.4	24.40	37.78	12.7	
3/8"	487.9	19.22	18.56	9.51	10-30
No 4	394.6	15.55	3.01	4.76	0-5
No 8	32.5	1.28	1.73	2.38	
No16	10.1	0.40	1.33	1.190	
No 30	4.1	0.16	1.17	0.595	
No 50	2.0	0.08	1.09	0.297	
No 100	2.6	0.10	0.99	0.149	
No 200	1.4	0.06	0.94	0.075	
Fondo	23.8	0.94	0.00		
Suma Tamiz	2514.5				
FONDO	23.8				

Fuente: elaboración propia.

Igualmente, para el agregado grueso natural se observa que cumple con la norma ICONTEC 174 encontrándose dentro de los rangos establecidos y garantizando así un buen y/o adecuado diseño de mezcla. Asimismo, la siguiente grafica permite observar la curva granulométrica que es el resultado del proceso de tamizaje realizado. Observar figura 13.

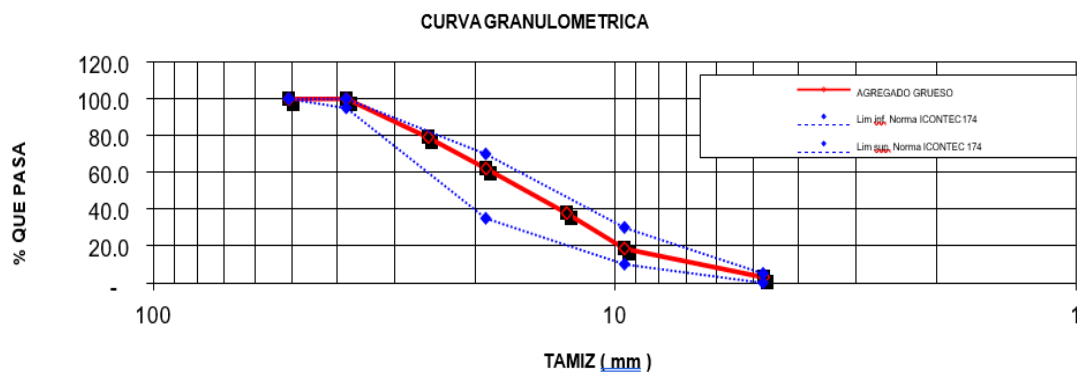


Figura 13. Curva granulométrica del agregado grueso natural. Fuente: elaboración propia.

5.1.3. Agregado grueso RCD.

En la Tabla 10 se pueden observar los resultados del ensayo de granulometría para el agregado grueso proveniente de los RCD.

Tabla 10

Resultados del ensayo granulométrico para el agregado grueso de RCD.

Tamiz	Peso Ret.	% Retenido	% Pasa	Tamiz mm	NORMA
					ICONTEC 174
3"	0.0	0.00	100.00	76.1	
2"	0.0	0.00	100.00	50.8	100
1 1/2"	0.0	0.00	100.00	38.1	95-100
1"	0.0	0.00	100.00	25.4	
3/4"	380.2	11.83	88.17	19.0	35-70
1/2"	576.8	17.94	70.23	12.7	
3/8"	245.9	7.65	62.58	9.51	10-30
No 4	390.4	12.14	50.44	4.76	0-5
No 8	207.6	6.46	43.98	2.38	
No16	126.7	3.94	40.04	1.190	
No 30	41.2	1.28	38.76	0.595	
No 50	16.6	0.52	38.24	0.297	
No 100	14.9	0.46	37.78	0.149	
No 200	5.4	0.17	37.61	0.075	
Fondo	1209.1	37.61	0.00		
Suma Tamiz	2005.7				
FONDO	1209.1				

Fuente: elaboración propia.

Igualmente, para el agregado grueso de RCD se observa en la figura 14 que los agregados no cumplen con la norma ICONTEC 174 por encontrarse fuera de los rangos establecidos y garantizando así un buen y/o adecuado diseño de mezcla. Asimismo, la siguiente grafica permite observar la curva granulométrica que es el resultado del proceso de tamizaje realizado.

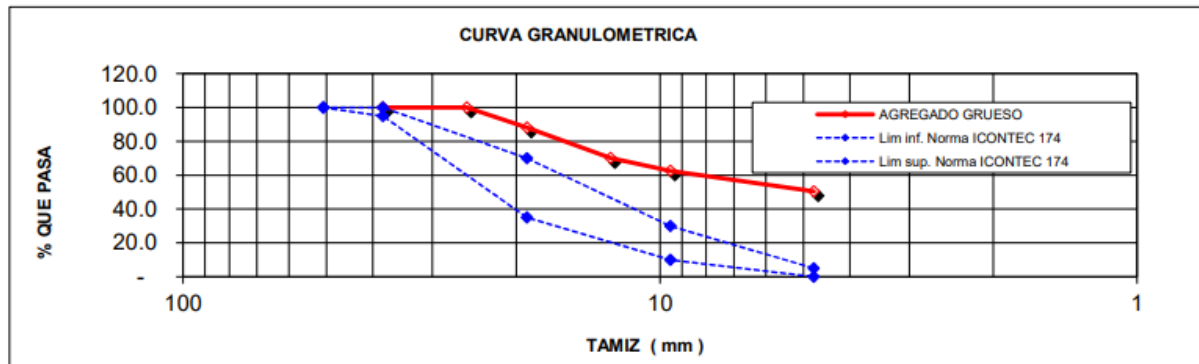


Figura 14. Curva granulométrica del agregado grueso RCD. Fuente: elaboración propia.

5.2. Propiedades físicas de los agregados

Con los resultados granulométricos obtenidos se procedió a la caracterización de las propiedades físicas como el peso unitario suelto y compactado, % de absorción, peso específico aparente seco, peso específico aparente saturado, peso específico nominal:

5.2.1. Agregado fino natural (Arena).

A continuación, en la tabla 11 se presenta el promedio de tres muestras en donde se determinó el peso unitario compacto y suelto de los agregados.

Tabla 11

Resultado de las propiedades físicas del agregado fino natural (Arena).

Muestra	Peso muestra Compacta (g)	Peso muestra Suelta (g)	Peso unitario Compacto (g/cm ³)	Peso unitario Suelto (g/cm ³)
1	8920	7857	1.560	1.374

2	8989	7868	1.572	1.376
3	8953	7824	1.566	1.368
Promedio			1.5659	1.3728

Fuente: elaboración propia.

Asimismo, en la Tabla 12 se puede observar el complemento de los ensayos realizados a las muestras de agregado fino.

Tabla 12

Resultado del ensayo en el laboratorio para el agregado fino.

Ensayo	Valor
Peso en el aire, Muestra seca g. (A)	560.4
Peso de la muestra saturada superficialmente seca g. (B)	570.0
Peso del volumen agua adicional g. (C)	310.1
Volumen frasco volumétrico cm ³ (D)	570.0
Peso Específico Aparente Seco (PEASEC)	2,238 gr /cm ³
Peso Específico Aparentemente Saturado (PEASAT)	2.193 gr/cm ³
Peso específico nominal	2.156 gr/cm ³
% Absorción	1.713

Fuente: elaboración propia.

5.2.2. Agregado grueso natural (canto rodado).

A continuación, en la tabla 13 se presenta el promedio de tres muestras en donde se determinó el peso unitario compacto y suelto de los agregados.

Tabla 13

Resultado de las propiedades físicas del agregado grueso natural (canto rodado).

Muestra	Peso muestra Compacta (g)	Peso muestra Suelta (g)	Peso unitario Compacto	Peso unitario Suelto (g/cm³)
----------------	--------------------------------------	------------------------------------	-----------------------------------	--

			(g/cm ³)	
1	8338	7692	1.458	1.345
2	8439	7672	1.476	1.342
3	8527	7399	1.491	1.294
Promedio			1.4751	1.3270

Fuente: elaboración propia.

Asimismo, en la Tabla 14 se puede observar el complemento de los ensayos realizados a las muestras de agregado grueso natural.

Tabla 14

Resultado del ensayo en el laboratorio para el agregado grueso natural (canto rodado).

Ensayo	Valor
Peso muestra seca g. (A)	1988.9
Peso de la muestra saturada superficialmente seca g. (B)	2023
Peso de la muestra en el aire grs. (A)	1988.9
Peso de la muestra saturada superficialmente seca g. (B)	2023
Peso en el agua, muestra saturada g. (C).	1230
Peso de la canastilla g	1585
Peso Específico Aparente Seco (PEASEC)	2.508 g/cm ³
Peso Específico Aparentemente Saturado (PEASAT)	2.551 g/cm ³
Peso específico nominal	2.621 g/cm ³
% Absorción	1.715

Fuente: elaboración propia.

5.2.3. Agregado grueso de RCD.

A continuación, se presenta el promedio de tres muestras en donde se determinó el peso unitario compacto y suelto de los agregados. (Observar tabla 15).

Tabla 15*Resultado de las propiedades físicas del agregado grueso (RCD)*

Muestra	Peso muestra Compacta (g)	Peso muestra Suelta (g)	Peso unitario Compacto (g/cm³)	Peso unitario Suelto (g/cm³)
1	7847	6973	1.372	1.219
2	7784	6905	1.361	1.208
3	8110	6853	1.418	1.198
		Promedio	1.3840	1.2085

Fuente: elaboración propia.

Asimismo, en la Tabla 16 se puede observar el complemento de los ensayos realizados a las muestras de agregado fino.

Tabla 16*Resultado del ensayo en el laboratorio para el agregado grueso RCD.*

Ensayo	Valor
Peso muestra seca g. (A)	1925.1
Peso de la muestra saturada superficialmente seca g. (B)	2056.1
Peso de la muestra en el aire g. (A)	1925.1
Peso de la muestra saturada superficialmente seca g. (B)	2056.1
Peso en el agua, muestra saturada g. (C).	11.30
Peso de la canastilla g	1505
Peso Específico Aparente Seco (PEASEC)	2.079 g/cm ³
Peso Específico Aparentemente Saturado (PEASAT)	2.220 g/cm ³
Peso específico nominal	2.421 g/cm ³
% Absorción	6.805

Fuente: elaboración propia.

Capítulo 6. Diseño de mezcla

6.1. Para el agregado de RCD

A continuación, en la tabla 17 de manera abreviada se presenta el proceso para el diseño de mezcla de RCD teniendo en cuenta los resultados del ensayo granulométrico al agregado fino y grueso. El diseño de mezcla se realizó bajo el método ACI del comité 211.1.

Tabla 17

Resumen del diseño mezcla para agregado de RCD.

Proceso de diseño	Valor	Referencia
Tamaño máximo del agregado	1"	
Contenido de aire seleccionado	1.5%	Anexo 3. Tabla 15.
Asentamiento	3"	
Contenido de agua	193 kg/m ³	Anexo 3. Tabla 16.
Resistencia requerida de diseño	520 kg/cm ²	Anexo 3. Tabla 17.
Relación agua cemento (A/C)	0,3	Anexo 3. Figura 18.
Cantidad de cemento	0,204 m ³	Cálculos, ver anexo 3.
Granulometría de los agregados gruesos	62,1 %	Cálculos, ver anexo 3.
Granulometría de los agregados finos	37,9 %	Cálculos, ver anexo 3.

Volumen de agregados grueso	0,373 m ³	Cálculos, ver anexo 3.
Volumen de agregado fino	0,228 m ³	Cálculos, ver anexo 3.
Peso del agregado grueso	450,77 kg	Cálculos, ver anexo 3.
Peso del agregado fino	312,99 kg	Cálculos, ver anexo 3.
Agua a ser adicionada (corrección por humedad)	199 litros	Cálculos, ver anexo 3.
Cantidad de cemento (corrección por humedad)	643,33 kg	Cálculos, ver anexo 3.
Agregado grueso (corregida por humedad)	453,83 kg	Cálculos, ver anexo 3.
Agregado fino (corregida por humedad)	339.93 kg	Cálculos, ver anexo 3.

Fuente: elaboración propia.

6.2. Para el agregado canto rodado

A continuación, en la tabla 18 de manera abreviada se presenta el proceso para el diseño de mezcla de RCD teniendo en cuenta los resultados del ensayo granulométrico al agregado fino y grueso. El diseño de mezcla se realizó bajo el método ACI del comité 211.1.

Tabla 18*Resumen del diseño de mezcla para agregado de canto rodado*

Proceso de diseño	Valor	Referencia
Tamaño máximo del agregado	1"	
Contenido de aire seleccionado	1.5 %	Anexo 3. Tabla 15.
Asentamiento	3"	Anexo 3. Tabla 16.
Contenido de agua	188 kg/m ³	
Resistencia requerida de diseño	520 kg/cm ²	Anexo 3. Tabla 17.
Relación agua cemento (A/C)	0,3	Anexo 3. Figura 18.
Cantidad de cemento	626,67 kg	Cálculos, ver anexo 4.
Volumen del cemento	0,199 m ³	Cálculos, ver anexo 4.
Granulometría de los agregados gruesos	60,32 %	Cálculos, ver anexo 4.
Granulometría de los agregados finos	39,68%	Cálculos, ver anexo 4.
Volumen de agregados grueso	0,370 m ³	Cálculos, ver anexo 4.
Volumen de agregado fino	0,243 m ³	Cálculos, ver anexo 4.
Peso del agregado grueso	490,99 kg	Cálculos, ver anexo 4.
Peso del agregado fino	333,59 kg	Cálculos, ver anexo 4.

Agua a ser adicionada (corrección por humedad)	163 litros	Cálculos, ver anexo 4.
Cantidad de cemento (corrección por humedad)	626,67 kg	Cálculos, ver anexo 4.
Agregado grueso (corregida por humedad)	501,30 kg	Cálculos, ver anexo 4.
Agregado fino (corregida por humedad)	362,31 kg	Cálculos, ver anexo 4.

Fuente: elaboración propia.

Capítulo 7. Resultados de la resistencia a la compresión

A continuación, se presentan los resultados de la resistencia a la compresión para las mezclas de concreto en sus diferentes proporciones de agregados.

Teniendo en cuenta la Figura 15 se puede observar que todos los diseños de mezcla a medida que pasan los días presentan mayor resistencia, como es de esperarse; asimismo, el diseño de mezcla que tiene 75% de RCD como remplazo del agregado grueso fue el que presentó una mayor resistencia a la compresión a los 28 días (4604 psi), aunque para el caso del día 7 y 14 el diseño de mezcla no obtuvo la mayor resistencia comparado con los demás se puede verificar que el valor está muy cercano a los valores reportados en los demás diseños.

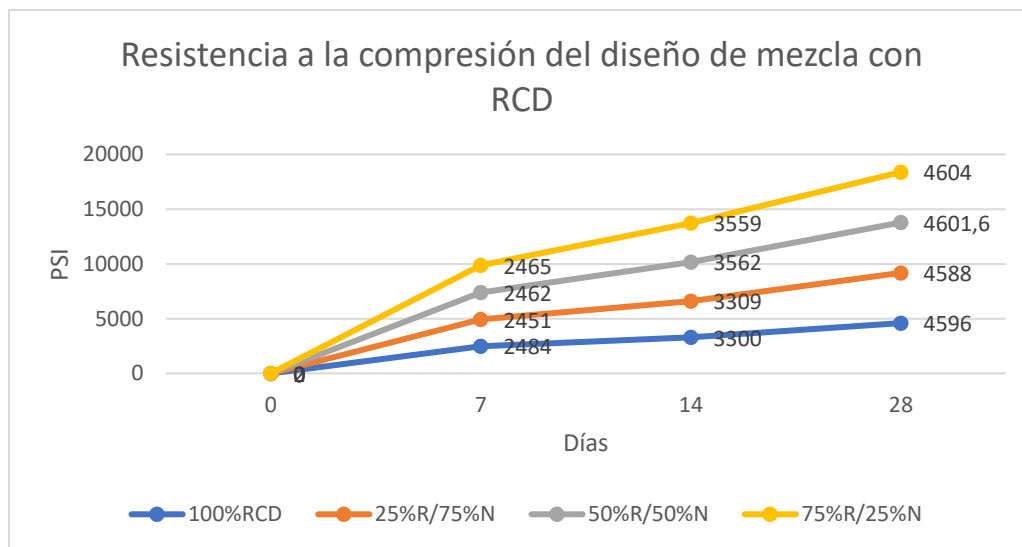


Figura 15. Resultados de la resistencia a la compresión.
Fuente: elaboración propia.

Asimismo, en la Figura 16, se puede observar que la resistencia a la compresión del diseño de mezcla con canto rodado, del cual se puede afirmar que para los 7, 14 y 28 días la resistencia estuvo por encima del concreto elaborado con agregado grueso de RCD.

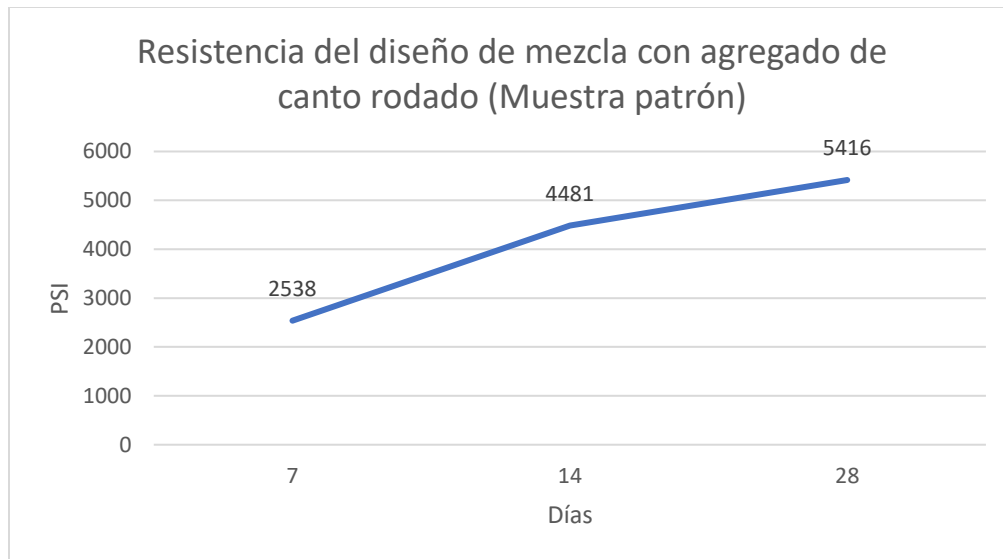


Figura 16. Resultados de la resistencia a la compresión del diseño de mezcla con agregado de canto rodado.
Fuente: elaboración propia.

Capítulo 8. Análisis de resultados

A continuación, se realiza una comparación de los resultados obtenidos en este estudio con los resultados de otras investigaciones.

Particularmente en este estudio se observa que a medida que pasan los días la resistencia a la compresión aumenta lo cual coincide con el resultado de investigación de Moreno, Manuel, Moctezuma, Alegría, & Moctezuma (2015) donde la resistencia para este tipo de concreto tuvo un incremento en la resistencia. Contrario a lo que se pudo observar en el estudio de Castillo, Chima y Rondón (2019), en donde se logró observar que las mezclas de concreto con agregado reciclado tienen una tendencia a reducir la resistencia a la compresión.

En síntesis, en términos técnicos es viable usar agregado grueso reciclado procedente de residuo de concreto de pavimento para uso estructural con porcentajes de reemplazo en volumen de hasta un 50%, logrando alcanzar resistencias aproximadas a 19 MPa (2800 psi) o 20 MPa (2900 psi) (Castillo, Chima y Rondón, 2019), sin embargo, en este estudio se encontraron resistencias más altas de hasta 4604 psi para los 28 días con un remplazo de 75% de RCD.

En el estudio de Remolina (2018), respecto a la variable edad de curado en días, se observa un comportamiento esperado por lo que ya se conoce respecto al concreto hecho con agregado reciclado, es decir, el valor de f'_c disminuye en la medida que el porcentaje de reemplazo aumenta; esto confirma la idea de la gran mayoría de los autores que han investigado respecto al concreto reciclado, la resistencia del concreto es inversamente proporcional al porcentaje de reemplazo de árido reciclado por árido natural, aunque en este estudio los resultados son distintos para los diseños de mezclas con remplazo del 25%, 50% y 75% en los cuales la resistencia aumenta aunque muy poca o ligeramente para el día 28.

Por último, de acuerdo con Remolina (2018) el contenido de agregado residual no es el único factor que influye en la disminución de f'_c del concreto, no obstante, es el que mayor influye; también otros factores como las condiciones iniciales en la que se establezca cada estudio como lo es la procedencia del residuo, la resistencia especificada buscada, la relación agua cemento utilizada, la absorción de agua del material, su porosidad, entre muchos otros.

Capítulo 9. Conclusiones

La reutilización de residuos de construcción y demolición (RCD) es un mecanismo que evita que estos ocupen espacios innecesarios en un relleno sanitario, su reutilización se debe a las propiedades que posee lo que los hace muy atractivos; además, su uso, eventualmente, evita impactos ambientales sobre todo cuando su disposición se realiza de manera inadecuada.

Se puede concluir que el agregado grueso de RCD no cumple satisfactoriamente con la normatividad NTC 174, por lo cual desde el punto de vista granulométrico es posible su utilización siempre y cuando se haga el pretratamiento que permita lograr el tamaño adecuado y retirar las impurezas propias del uso del material, por lo que recurrimos al método de Fuller-Thompson una vez realizada la granulometría para obtener el módulo granulométrico, tamaño máximo de Fuller y proporción de agregado grueso y fino.

El porcentaje de absorción del RCD es de 6.805% y el del canto rodado 1.715% necesitándose mayor cantidad de agua a adicionar a la mezcla de RCD con valor 199 lts y 163.10 lts respectivamente. Lo anterior demuestra la porosidad del RCD.

En cuanto a los resultados del ensayo a la compresión se puede concluir que el diseño de mezcla que tuvo mayor resistencia a la compresión utilizando los RCD es en proporción de 75% RCD y 25% de canto rodado con 4604 PSI (31,74 MPA) a los 28 días, asimismo, se evidenció que a medida que los días van pasando el concreto mejora su resistencia. En cuanto a la muestra patrón, a los 28 días obtuvo una resistencia de 5416 PSI de manera que fue mayor que la resistencia obtenido por el concreto con remplazo de RCD con una diferencia entre los dos concretos de 812 PSI.

De acuerdo con las resistencias obtenida y luego de una consulta en la literatura se puede concluir que este concreto se puede utilizar en la construcción de muros de contención de gravedad, y construcción de pavimentos.

Capítulo 10. Recomendaciones

Teniendo en cuenta los objetivos planteados y los resultados presentados, a continuación, se mencionan un compendio de recomendaciones.

- Utilizar aditivos que permitan obtener una mayor resistencia a la compresión.
- Realizar otras investigaciones en donde haya una variación en las proporciones del agregado grueso, esto con el fin de determinar el comportamiento de la resistencia a la compresión.
- Indagar sobre el comportamiento de otras propiedades del concreto diseñado con agregado grueso de RCD.

Referencias

- Allen. (2015). Flandes, Bélgica – El Mejor Programa de Reciclaje y Prevención de Residuos de Europa. Bélgica. no-burn. Recuperado de <http://www.no-burn.org/wp-content/uploads/Flandes-1.pdf>
- Bazalar, R y Cadenillas, J. (2019). Propuesta de agregado reciclado para la elaboración de concreto estructural con $f'c=280 \text{ kg/cm}^2$ en estructuras aporticadas en la ciudad de Lima para reducir la contaminación ambiental. (Tesis pregrado). Universidad Peruana De Ciencias Aplicadas. Lima, Perú.
- Botero, L. G. (2003). Sostenibilidad de la disposición de escombros de construcción y demolición en Bogotá. Tesis Universidad de los Andes.
- Blandón, E., Gálvis, C., Valderrama, A y Vargas, L (2018). Diagnóstico y propuesta de manejo, control y caracterización de los RCD (residuos de la construcción y la demolición) en el municipio de Dosquebradas, Risaralda. Universidad Libre de Pereira. Pereira, Colombia.
- Cruz, M y Gómez, O (2013) Influencia del Agregado Grueso Reciclado de Mampostería en el Comportamiento del Concreto Reciclado. (Tesis para optar por el título de ingeniero civil). Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia.
- Castillo, A., Chima, A y Rondón, G (2019) Estudio de Prefactibilidad de Concreto Sostenible usando agregado grueso reciclado en Barranquilla. (Tesis de ingeniero civil). Corporación Universitaria de la Costa. Barranquilla, Colombia.

Collantes, A y Eslava, A (2018). influencia del agregado reciclado sobre la compresión, abrasión, asentamiento y permeabilidad en el concreto permeable no estructural. (Tesis de pregrado).

Universidad Nacional de Trujillo. Trujillo, Perú.

Consejo Mundial Empresarial para el Desarrollo Sostenible (2009). Reciclado de Concreto. Washington Copyright. 65 p.

Decreto Ley 2811 de 1974, Código de Recursos Naturales Renovables. Recuperado de: [Microsoft Word - DecretoLey2811de1974CodigoRecursosNaturalesRenovables.doc](https://www.parquearvi.org/Word_-_DecretoLey2811de1974CodigoRecursosNaturalesRenovables.doc)
([parquearvi.org](https://www.parquearvi.org))

De Guzmán Sánchez, D. (2001). Tecnología del concreto y del mortero. Santa fe de Bogotá.

Decreto 1713 de 2002. Por el cual se reglamenta la Ley 142 de 1994, la Ley 632 de 2000 y la Ley 689 de 2001, en relación con la prestación del servicio público de aseo, y el Decreto Ley 2811 de 1974 y la Ley 99 de 1993 en relación con la Gestión Integral de Residuos Sólidos. Recuperado de: [Derecho del Bienestar Familiar \[DECRETO 1713 2002\] \(icbf.gov.co\)](https://www.icbf.gov.co/Decreto_1713_2002)

Decreto 1077 del 2015. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio. Recuperado de: [Decreto 1077 de 2015 Sector Vivienda, Ciudad y Territorio - EVA - Función Pública](https://www.funcionpublica.gov.co/Decreto_1077_de_2015_Sector_Vivienda_Ciudad_y_Territorio_-_EVA_-_Funcion_Publica)
([funcionpublica.gov.co](https://www.funcionpublica.gov.co))

Duran, V (2015) “no saque la piedra a la montaña. El Espectador. Tomado de: <https://www.elespectador.com/noticias/bogota/no-le-saque-la-piedra-a-la-montana/>

- Escandón, J. (2011). Diagnóstico técnico y económico del aprovechamiento de residuos de construcción y demolición en edificaciones en la ciudad de Bogotá. (Tesis de Pregrado). Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá.
- Forster S (1986). Recycled Concrete as Aggregate. En: Concrete International, Vol. 8, pp 34-40
- Federal Highway Administration (2004). FHWA Transportation Application of Recycled Concrete Aggregate. Washington.D.C.FHWA
- Guzmán, M y Soler, A (2019). Estudio de factibilidad para la creación de una planta para el aprovechamiento de los residuos de la construcción y demolición (RCD) en Bogotá. (Tesis de pregrado). Universidad de la Salle. Bogotá.
- Guacaneme, F (2015). Ventajas y uso del concreto reciclado. (Tesis de pregrado). Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia.
- Kosmatka, S y Panarese, W, (1992). Diseño y control de mezcla de concreto. Recuperado de: [Diseño y control de mezclas de concreto pca kosmatka, kerkhoff, panarese y tanesi by Daniel Sejas Catalan - issuu](#)
- Markandeya, P., Kameswari P. (2015). Construction and Demolition Waste Management – A Review. International Journal of Advanced Science and Technology, (84), 19-46.
- Morales, C. (2004). Reciclaje de concreto y ladrillo de desecho de construcción como agregado grueso en el concreto. (Tesis de pregrado). Universidad Católica de Colombia. Facultad Ingeniería. Programa Ingeniería Civil. Bogotá. D.C.

Moreno, G., Manuel, J., Moctezuma, M., Alegría, H., & Moctezuma, A. M. (2015). Reuse of Hydraulic Concrete Waste as a New Material in Construction Procedures : a Sustainable Alternative in Northwest Mexico.

NTC 673 (2010). Concretos. Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto. Editada por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC)

NTC 2871 (2004) Método de ensayo para determinar la resistencia del concreto a la flexión (utilizando una viga simple con carga en los tercios medios). Editada por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).

NTC (504). Ingeniería civil y arquitectura referentado de espécimen cilíndricos de concreto. Recuperado de: [NORMA TÉCNICA COLOMBIANA PDF Descargar libre \(docplayer.es\)](https://www.docplayer.es/363328885-INV-E-123-13-pdf.html)

NTC (174). Concretos. Especificaciones de los agregados para concreto.

Norma INV E-123. Recuperado de: [363328885 INV E 123 13 pdf - StuDocu](https://www.studocu.com/document/universidad-de-bogota/ingenieria-civil/363328885-inv-e-123-13-pdf/4444444)

Norma A.C.I 211.1. Recuperado de: ACI. 1998. Standard Practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete. ACI 211.1-91.

Ley 1383 del 2010. Por la cual se reforma la ley 769 de 2002 Código Nacional de Tránsito, y se dictan otras disposiciones. Recuperado de: [Ley 1383 de 2010 - Código Nacional de Tránsito \(rentandes.com\)](https://www.rentandes.com/ley-1383-de-2010-codigo-nacional-de-transito/)

Ley 99 de 1993. Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras

disposiciones. Recuperado de: [Ley 99 de 1993 | Secretaría Distrital del Hábitat \(habitatbogota.gov.co\)](#)

Ley 1259 del 2008. Por medio de la cual se instaure en el territorio nacional la aplicación del comparendo ambiental a los infractores de las normas de aseo, limpieza y recolección de escombros; y se dictan otras disposiciones. Recuperado de: [Leyes desde 1992 - Vigencia expresa y control de constitucionalidad \[LEY 1259 2008\] \(secretariassenado.gov.co\)](#)

Pérez, A. (2012). Uso de triturado de ladrillo reciclado triturado de ladrillo reciclado como agregado grueso en la como agregado grueso en la elaboración de concreto. *Revista de la facultad de ingeniería*. Vol. 13. No. 26. P- 116-125.

Palomino, A y Maldonado, A. (2018). Sustitución experimental del agregado grueso de origen pétreo, por agregado grueso producto de residuos de construcción y demolición en la ciudad de Bogotá, para la elaboración de concreto hidráulico. (Tesis de pregrado). Universidad Distrital Francisco José De Caldas. Bogotá. Colombia.

Resolución 472 DE 2017. Por la cual se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en las actividades de Construcción y Demolición (RCD) y se dictan otras disposiciones. Recuperado de: [¿Cómo cumplir con la Resolución 472 de 2017 en los proyectos de construcción en Colombia? • Maat](#)

Resolución 1482 del 2017. Por medio de la cual se reglamenta el registro de generadores y gestores en el marco de la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición- RCD- en el distrito de Barranquilla y se dictan otras disposiciones. Recuperado de: Normatividad Barranquilla Verde - Establecimiento Público Ambiental

Resolución 541 de 1994. Por medio de la cual se regula el cargue, descargue, transporte, almacenamiento y disposición final de escombros, materiales, elementos, concretos y agregados sueltos, de construcción, de demolición y capa orgánica, suelo y subsuelo de excavación. Recuperado de: [res_0541_141294.pdf \(minambiente.gov.co\)](#)

Rosero, D. (2019). Propuesta de guía de uso de los agregados reciclados en Colombia provenientes de RCD basado en normativa internacional y en el desarrollo de investigaciones de universidades colombianas. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

Sánchez, D. (2001). Tecnología del concreto y del mortero: diseño de mezclas de concreto. 5 ed. Bogotá: Bhandar, 2001, p. 221.


Secretaría de ambiente de Bogotá. (2015). Guía para la elaboración del plan de gestión de residuos de construcción y demolición - RCD en la obra. Recuperado de: <http://www.ambientebogota.gov.co/web/publicaciones-sda/cartilla-rcd>

Zuluaga, F. (2013). Evaluación del comportamiento del concreto elaborado con desechos de icopor. (Tesis de pregrado). Escuela Colombiana De Ingeniería Julio Garavito. Bogotá. Colombia.

Vargas, M (2019). Investigación sobre el manejo de residuos en construcción entre Europa, América Y Colombia. (Tesis de pregrado). Universidad Militar de Colombia. Bogotá, Colombia.

Won, J., & Cheng, J. (2017). Identifying potential opportunities of building information modeling for construction and demolition waste management and minimization. *Automation in Construction*, 79, 3-18.

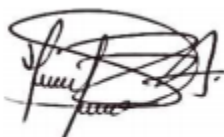
Anexo A. Certificados de los ensayos granulométricos.

GRANULOMETRIA Norma: INV E-123	
---------------------------------------	--

Proyecto:	Empresa:
Fecha: Septiembre 2020	Solicita:
Descripción Visual Del Material: Arena de color amarillo.	

PESO DE LA MUESTRA :	1,611.4	MODULO DE FINURA :	1.86
----------------------	---------	--------------------	------

Tamiz	Peso Ret.	% Retenido	% Pasa	tamiz mm	NORMA ICONTEC 174
3/8 "	0.0	0.00	100.00	9.51	100.0
No 4	0.0	0.00	100.00	4.75	95-100
No 8	0.0	0.00	100.00	2.38	80-100
No16	9.0	0.56	99.44	1.19	50-85
No 30	424.3	26.33	73.11	0.595	25-60
No 50	655.8	40.70	32.41	0.297	10-30
No 100	372.4	23.11	9.30	0.149	2-10
No 200	95.0	5.90	3.41	0.075	0-0
Fondo	54.9	3.41	0.00		
Suma Tamiz	1556.5				



Vo.Bo. Dpto de ingeniería



Jefe de Laboratorio

Anexo C. Cálculo requerido en el diseño de mezcla de RCD

Metodo de diseño: ACI del comité 211.1**Uso del concreto:** PAVIMENTO O MURO DE CONTENCIÓN POR GRAVEDAD**Resistencia a la compresión:** 6000 psi / 42 MPa / 420 kg/cm²**Condición de exposición:** Normal**Tamaño máximo del agregado:** 1"**Contenido de aire**

Por medio de la Tabla C.1 se determina el contenido de aire en función del tamaño máximo del agregado y del tipo de exposición. Con base en los resultados de los ensayos de granulometría se puede determinar que el tamaño máximo del agregado es de 1" y con la condición de aire naturalmente atrapado se determina la cantidad de aire esperado sin aire incluido el cual es 1.5%.

Tabla C.1. Cantidad aproximada de aire esperado en concretos sin aire incluido para diferentes tamaños máximos de agregados.

Tamaño máximo nominal del agregado		Contenido de aire en porcentaje (por volumen)			
mm	pulg.	Naturalmente atrapado	Exposición ligera	Exposición moderada	Exposición severa
9,51	3/8	3	4,5	6,0	7,5
12,7	1/2	2,5	4,0	5,5	7,0
19,0	3/4	2,0	3,5	5,0	6,0
25,4	1	1,5	3,0	4,5	6,0
38,1	1 1/2	1,0	2,5	4,5	5,5
50,6	2	0,5	2,0	4,0	5,0
76,1	3	0,3	1,5	3,5	4,5
152,0	6	0,2	1,0	3,0	4,0

Nota: Cantidad de aire en la mezcla a obtener según el tipo de exposición que va a tener el concreto.
Adaptada de (De Guzman Sanchez, 2001)

Contenido de agua

Se determina el contenido de agua de mezclado para garantizar la hidratación y fluidez de la mezcla. Este valor se obtiene de la Tabla C.2 que resulta en función del asentamiento y el tamaño máximo del agregado. El asentamiento de acuerdo con elemento que se propone como estudio es de 3". El valor calculado de agua de mezclado es 193 kg/m³.

Tabla C.2. (métrica). Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales del agregado.

Diseño y Control de Mezclas de Concreto • EB201

Tabla 9-5. (Métrica). Requisitos Aproximados de Agua de Mezcla y Contenido de Aire para Diferentes Revenimientos y Tamaños Máximos Nominales del Agregado

Revenimiento (asentamiento) (mm)	Agua, kilogramos por metro cúbico de concreto, para los tamaños de agregado indicados*						
	9.5 mm	12.5 mm	19 mm	25 mm	37.5 mm	50 mm**	75 mm**
Concreto sin aire incluido							
25 a 50	207	199	190	179	166	154	130
75 a 100	228	216	205	193	181	169	145
150 a 175	243	228	216	202	190	178	160
Cantidad aproximada de aire atrapado en un concreto sin aire incluido, porcentaje	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3
Concreto con aire incluido							
25 a 50	181	175	168	160	150	142	122
75 a 100	202	193	184	175	165	157	133
150 a 175	216	205	197	184	174	166	154
Promedio del contenido de aire total recomendado, para el nivel de exposición, porcentaje†							
Exposición leve	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5
Exposición moderada	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5
Exposición severa	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5

* Estas cantidades de agua de mezcla son para utilizarse en el cálculo de los contenidos de cementos en las mezclas de prueba. Estas cantidades son máximas para agregados gruesos razonablemente angulares con granulometría dentro de los límites de las especificaciones.

** El revenimiento (asentamiento) del concreto conteniendo agregado mayor que 37.5 mm se basa en el ensayo de revenimiento realizado después de la remoción de las partículas mayores que 37.5 mm, a través de cribado húmedo.

† Las especificaciones de obra deben especificar un contenido de aire en el concreto entregado en la obra dentro -1 +2 puntos porcentuales del valor anotado en la tabla para las exposiciones moderada y severa.

Adaptada del ACI 211.1 y del ACI 318. Hover (1995) presenta esta información en la forma de gráfico.

CS Escaneado con CamScanner

Fuente: Kosmatka y Panarese, 1992.

Resistencia requerida de diseño

Como no se tiene registro de pruebas de resistencias en donde se usaron materiales y condiciones similares, se determina la resistencia de diseño. En la Tabla C.3 se selecciona dicha resistencia y como la resistencia es más de 350 kg/cm² se escoge:

$$f'_c = 420 \text{ kg/cm}^2 + 100$$

$$f'_c = 520 \text{ kg/cm}^2$$

Tabla C.3. Resistencia de diseño cuando no hay datos que permitan determinar la desviación estándar.

Resistencia específica f'_c (kg/cm ²)	Resistencia de diseño de la mezcla f'_c (kg/cm ²)
Menos de 210	$f'_c + 70$
de 210 a 350	$f'_c + 85$
Mas de 350	$f'_c + 100$

Nota: factor de aumento de la resistencia de diseño de la mezcla de concreto cuando no se tienen datos estadísticos. Adaptada de (De Guzman Sanchez, 2001)

Relación agua-cemento

De la siguiente figura se puede obtener la relación agua cemento, para ello se selecciona la resistencia de diseño a los 28 días y se intercepta la línea correspondiente a concreto sin aire incluido, lo que da como resultado una relación A/C de 0.3.

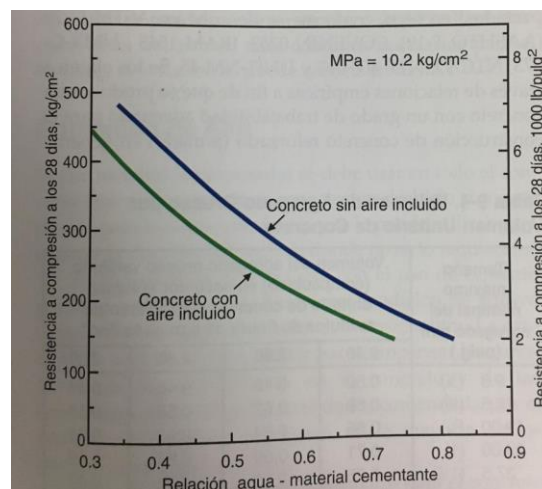


Figura C.1. Relación agua – material cementante. Fuente: Kosmatka y Panarese, 1992.

Cantidad de cemento

Con la relación agua cemento y la cantidad en litros de agua de mezclado obtenida en el paso 2 se tiene:

$$\text{Contenido de cemento} = \frac{\text{Contenido de agua}}{\text{relación A/C}} = \frac{193 \text{ kg/m}^3}{0.30} = 643.33 \text{ kg}$$

$$\text{Densidad del cemento} = \frac{643.33 \text{ kg}}{V}$$

$$V = \frac{643.33 \text{ kg}}{\text{Densidad del cemento}} = \frac{643.33 \text{ kg}}{3150 \text{ kg/m}^3} = 0.204 \text{ m}^3$$

Granulometría de los agregados grueso y fino

Para la caracterización de los agregados se utilizó el método de Fuller – Thomson donde se obtiene los módulos granulométricos y el porcentaje de agregado grueso y fino en la mezcla el cual corresponde a 62.1% y 37.9% respectivamente.

Volumen de agregados

A continuación, se determina el volumen de los agregados en la mezcla de concreto, para ello restamos 1 m³ de concreto, que es el volumen de diseño, menos el volumen de cemento y el volumen de agua.

$$V_{\text{agregados}} = 1 - 0.204 \text{ m}^3 - 0.193 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{agregados}} = 0.603 \text{ m}^3$$

El volumen de agregado para la mezcla de 1 m³ es de 0.603 m³ de los cuales, de acuerdo con el análisis granulométrico por el método de Fuller, le corresponde al agregado grueso 0.373 m³ y al agregado fino 0.228 m³. Para determinar el peso del agregado grueso y fino empleamos la fórmula de densidad.

Agregado grueso

$$\text{Densidad} = \frac{m}{V}$$

$$M = \text{Densidad} * V = 1208.5 \text{ kg/m}^3 * 0.373 \text{ m}^3 = 450.77 \text{ kg}$$

Agregado fino

$$\text{Densidad} = \frac{m}{V}$$

$$M = \text{Densidad} * V = 1372.8 \text{ kg/m}^3 * 0.228 \text{ m}^3 = 312.99 \text{ kg}$$

Corrección por humedad

Los contenidos de humedad del agregado grueso y fino son 0.68% y 8.61% respectivamente, y la absorción es 6.80% y 1.713%.

Con los contenidos de humedad indicados, las proporciones de agregados de la mezcla se vuelven:

$$\text{Agregado grueso: } 450.77 * 1.00681 = 453.83 \text{ kg}$$

$$\text{Agregado fino: } 312.99 * 1.0861 = 339.93 \text{ kg}$$

El agua absorbida por los agregados no se toma parte del agua de la mezcla y se debe excluir del ajuste de agua.

$$\text{La humedad superficial aportada por el agregado grueso es } 0.68\% - 6.80\% = -6.12\%$$

$$\text{La humedad aportada por el agregado fino es } 8.61\% - 1.713\% = 6.897\%.$$

El requisito estimado para el agua se vuelve:

$$193 - (450.77 * (-0.0612)) - (312.99 * 0.06897) = 199 \text{ kg}$$

La masa de la mezcla estimada para un metro cubico se revisa para incluir la humedad de los agregados:

$$\text{Agua (a ser adicionada)} = 199 \text{ kg (lts)}$$

$$\text{Cemento} = 643.33 \text{ kg}$$

$$\text{Agregado grueso (CH 2,1\%)} = 450.77 \text{ kg}$$

$$\text{Agregado fino (CH 8.61\%)} = \underline{312.99 \text{ kg}}$$

$$\text{TOTAL} = 1606.09 \text{ kg}$$

Anexo D. Cálculo realizado para el diseño de mezcla con agregado grueso de canto rodado.

Cantidad de cemento

Con la relación agua cemento y la cantidad en litros de agua de mezclado obtenida en el paso 2 se tiene:

$$\text{Contenido de cemento} = \frac{\text{Contenido de agua}}{\text{relación A/C}} = \frac{188 \text{ kg/m}^3}{0.30} = 626.67 \text{ kg}$$

$$\text{Densidad del cemento} = \frac{626.67}{V}$$

$$V = \frac{626.67 \text{ kg}}{\text{Densidad del cemento}} = \frac{626.67 \text{ kg}}{3150 \text{ kg/m}^3} = 0.199 \text{ m}^3$$

Granulometría de los agregados grueso y fino

Para la caracterización de los agregados se utilizó el método de Fuller – Thomson donde se obtiene los módulos granulométricos y el porcentaje de agregado grueso y fino en la mezcla el cual corresponde a 60.32% y 39.68% respectivamente.

Volumen de agregados

A continuación, se determina el volumen de los agregados en la mezcla de concreto, para ello restamos 1 m³ de concreto, que es el volumen de diseño, menos el volumen de cemento y el volumen de agua.

$$V_{\text{agregados}} = 1 - 0.199 \text{ m}^3 - 0.188 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{agregados}} = 0.613 \text{ m}^3$$

El volumen de agregado para la mezcla de 1 m³ es de 0.613 m³ de los cuales, de acuerdo al análisis granulométrico por el método de Fuller, le corresponde al agregado grueso 0.370 m³ y al agregado fino 0.243 m³. Para determinar el peso del agregado grueso y fino empleamos la fórmula de densidad.

Agregado grueso

$$\text{Densidad} = \frac{m}{V}$$

$$M = \text{Densidad} * V = 1327 \text{ kg/m}^3 * 0.370 \text{ m}^3 = 490.99 \text{ kg}$$

Agregado fino

$$\text{Densidad} = \frac{m}{V}$$

$$M = \text{Densidad} * V = 1372.8 \text{ kg/m}^3 * 0.243 \text{ m}^3 = 333.59 \text{ kg}$$

Corrección por humedad

Los contenidos de humedad del agregado grueso y fino son 2.1% y 8.61% respectivamente, y la absorción es 1.715% y 1.713%.

Con los contenidos de humedad indicados, las proporciones de agregados de la mezcla se vuelven:

$$\text{Agregado grueso: } 490.99 * 1.021 = 501.30 \text{ kg}$$

$$\text{Agregado fino: } 333.59 * 1.0861 = 362.31 \text{ kg}$$

El agua absorbida por los agregados no se toma parte del agua de la mezcla y se debe excluir del ajuste de agua. La humedad superficial aportada por el agregado grueso es 2.1% - 1.715% = 0.385% , la humedad aportada por el agregado fino es 8.61% - 1.713% = 6.897%. El requisito estimado para el agua se vuelve:

$$188 - (490.99 * 1.00385) - (333.59 * 1.06897) = 163.10 \text{ kg}$$

La masa de la mezcla estimada para un metro cubico se revisa para incluir la humedad de los agregados:

$$\text{Agua (a ser adicionada): } 163.10 \text{ kg (163.10 lts)}$$

$$\text{Cemento: } 626.67 \text{ kg}$$

Agregado grueso (CH 2,1%): 501.30 kg

Agregado fino (CH 8.61%): 362.31 kg

TOTAL: 1653.38 kg